



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VYUŽITÍ AKUSTICKÉ EMISE PŘI SLEDOVÁNÍ  
HYDRAULICKÝCH STROJŮ**

MONITORING OF HYDRAULIC MACHINES USING ACOUSTIC EMISSIONS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Dalibor Závorka**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Dalibor Závorka**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Fluidní inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Využití akustické emise při sledování hydraulických strojů**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Sledování akustické emise je možno využít při diagnostice a předpovídání poruch v počátku jejich vzniku. V hydraulickém systému je možno pomocí sledování akustické emise předpovídat kavitaci. Úkolem diplomanta bude na jednoduchém měřeném příkladu v laboratoři ukázat možnosti akustické emise.

### **Cíle diplomové práce:**

Literární rešerše problematiky.  
Navržení experimentu a postupu vyhodnocení.  
Měření akustické emise v laboratoři.  
Vyhodnocení naměřených dat.

### **Seznam doporučené literatury:**

SMETANA, C., a kol.: Hluk a vibrace: měření a hodnocení. Praha: sdělovací technika, 1998. str. 188 s. Sv. I. ISBN 80-901936-2-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je objasnit možnosti využití akustické emise jako diagnostického nástroje pro použití u hydraulických strojů. Zejména při odhalování výskytu trhlin v součástech stroje, a to za předpokladu změny v akustickém projevu části za provozu. Toto objasnění je postaveno na sérii jednoduchých měřených experimentů, které jsou založeny na sledování projevu šroubu umístěného do proudu kapaliny v trubici, přičemž je dotažen vůči vnitřní stěně potrubí patřičným utahovacím momentem. Tímto předepnutím je simulována trhlina v tělese. Velké předepnutí má simulovat malou nebo žádnou trhlinu, a naopak malé, nebo žádné předepnutí představuje trhlinu velkou. Experimenty jsou měřeny pomocí skupiny snímačů tlaku a zrychlení a jejich vyhodnocení je provedeno pomocí programu vytvořeného v softwaru MATLAB. Výstupy programu jsou grafy efektivních hodnot z celého záznamu měření rozdělené na jednotlivé frekvence spektra a grafy poměrných vzrůstů. Tyto grafy porovnávají spektra jednotlivých konfigurací pro posouzení projevu změn jednotlivých parametrů.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Akustická emise, zvuk, akustická diagnostika, kavitace, RMS, Fourierova transformace, Matlab, tlakové pulzace, vibrace, buzení proudem kapaliny

## **ABSTRACT**

The goal of this diploma thesis is to clarify possibilities of usage of acoustic emission as a hydraulic machinery diagnostics tool. Especially for exposing presence of ruptures or cracks in the parts of machine, assuming changes in acoustic exposure of the part during operation. This clarification is based on series of simple measured experiments, which consist of monitoring the bolt placed in fluid stream inside of a pipe. This bolt was preloaded against inner wall of pipe by appropriate tightening torque. This preload is supposed to simulate effects of the size of rupture. High preload simulates small rupture or none in object and respectively small preload is supposed to simulate big rupture. A group of pressure sensors and accelerometers measures experiments and their evaluations are processed by script created in software MATLAB. Outputs of this script are charts with effective values of respective sensors from the entire record split into individual frequency spectrums. These charts compare spectrums of each configuration to judge effects of parameters changes.

## **KEYWORDS**

Acoustic diagnostic, cavitation, sound, acoustic diagnostics, RMS, Fourier transformation, Matlab, pressure pulsations, vibrations, fluid stream excitation



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZÁVORKA, D. *Využití akustické emise při sledování hydraulických strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 75 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D..





## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Vladimíra Habána, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2016

.....

Dalibor Závorka



## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, doc. Vladimíru Habánovi za cenné rady a vedení při psaní a vývoji této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat inženýru Martinu Hudcovi za veškerou pomoc s realizací experimentálního měření. V neposlední řadě také své rodině za podporu během celého dosavadního studia.





## OBSAH

Úvod .....	15
1 Základní pojmy z akustiky .....	17
1.1 Vibrace a kmitání .....	17
1.2 Akustická emise .....	17
1.3 Útlum akustických vln .....	18
1.4 Akustická emise jako NDT metoda .....	18
2 Zpracování signálu .....	20
2.1 Získání užitečného signálu .....	20
2.2 Střední hodnota .....	21
2.3 Efektivní hodnota RMS .....	21
2.4 Fourierova transformace .....	22
2.5 Parsevalův teorém .....	23
3 Experiment .....	24
3.1 Návrh experimentu a metodika vyhodnocení .....	24
3.2 Příprava Experimentu .....	27
3.3 Provedení prvního experimentu .....	28
3.4 Provedení druhého experimentu .....	31
3.5 Tvorba programu pro vyhodnocení .....	33
3.5.1 Automatické načítání souborů .....	33
3.5.2 Získání středních hodnot záznamu .....	34
3.5.3 Fourierova transformace .....	35
3.5.4 Efektivní hodnota RMS .....	37
3.5.5 Škálované RMS dle frekvencí .....	39
4 Výsledky a jejich zhodnocení .....	42
4.1 Výsledky prvního experimentu .....	42
4.1.1 Výsledky snímače 1X .....	43
4.1.2 Výsledky snímače 2X .....	44
4.1.3 Výsledky snímače 2Y .....	45
4.1.4 Výsledky snímače Kistler 1 .....	46
4.1.5 Výsledky snímače Kistler 2 .....	47
4.2 Analýza poměrných změn hodnot prvního experimentu .....	48
4.2.1 Poměrné změny - snímač 1X .....	48
4.2.2 Poměrné změny - snímač 2X .....	49
4.2.3 Poměrné změny - snímač 2Y .....	50
4.2.4 Poměrné změny - snímač Kistler 1 .....	51



4.2.5	Poměrné změny - snímač Kistler 2 .....	52
4.3	Výsledky druhého experimentu.....	53
4.3.1	Výsledky akcelerometru 1X.....	53
4.3.2	Výsledky akcelerometru 2X.....	54
4.3.3	Výsledky akcelerometru 2Y .....	56
4.3.4	Výsledky tlakového snímače Kistler 1 .....	57
4.3.5	Výsledky tlakového snímače Kistler 2.....	59
4.4	Analýza poměrného nárůstu hodnot druhého experimentu.....	61
4.4.1	Poměrné změny - snímač 1X .....	61
4.4.2	Poměrné změny - snímač 2X .....	62
4.4.3	Poměrné změny – snímač 2Y .....	64
4.4.4	Poměrné změny - snímač Kistler 1 .....	65
4.4.5	Poměrné změny – snímač Kistler 2.....	67
5	Závěr .....	69
6	Použité informační zdroje .....	72
7	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	73
8	Seznam obrázků .....	74



## Úvod

Za účelem monitorování stavu a životnosti hydraulických strojů a jejich částí, jako jsou oběžná kola, ložiska a jiné pohyblivé mechanické části konvenčními metodami, je nutné stroj rozebrat. To nevyhnutelně souvisí s odstávkou a přerušením provozu na dobu nezbytně nutnou ke kompletní kontrole všech kritických uzlů. Kromě konvenčních diagnostických metod však existuje celá řada metod nekonvenčních. Jednou z nich je metoda akustické emise. Diagnostika pomocí metody akustické emise je pasivní metodou, která využívá jako zdroje informací nízkourovňové napětové impulzy vznikající například šířením trhliny. Metoda se již delší dobu používá v mnoha oblastech průmyslu. Od monitorování stavu ložisek přes zkoušení tlakových nádob až po kontrolu kvality svarových spojů. Nespornou výhodou této metody diagnostiky je jednoduchost, rychlost a možnost průběžného monitorování součásti bez nutnosti demontování.

Cílem této diplomové práce je objasnění možnosti využití této metody pro diagnostiku a sledování hydraulických strojů. Těleso vystavené vlivu obtékání vodou nebo jinou tekutinou je tímto médiem buzeno a kmitá. Dochází tedy ke vzniku pro tuto metodu nutných nízkourovňových impulzů. Základním předpokladem experimentu je, že akustické projevy takto buzených součástí s vadou a zdravé součásti bez jakékoliv vady budou odlišné. V případě zdravé součásti očekáváme při převodu záznamu kmitání součásti pomocí Fourierovy transformace do frekvenční oblasti jednu významnou frekvenci, popřípadě může tuto frekvenci doprovázet řada menších harmonických frekvencí. Prasklina či jiná vada by se měla projevit vznikem tzv. „parohů“, tedy rozdělením vrcholku vlastní frekvence na dva vrcholky oba posunuté vpravo a vlevo od původního vrcholu. Toto je ideální očekávaný projev, nicméně v reálném provozu musíme počítat s dalšími rušivými vlivy jiných pohyblivých součástí, proudící vody a také případné kavitace. Trhlina v tělese je u tohoto experimentu simulována pomocí předepnutého šroubu umístěného v trubici. Šroub je vhodně upraven sražením závitu z důvodu menšího ovlivňování proudění a je předepnut vůči vnitřní straně trubice pomocí přivařené matice. Z důvodu zabránění samovolnému povolování vlivem vibrací je pak šroub vybaven kontramaticí. Samotná trhlina je simulována velikostí předepnutí šroubu daným utahovacím momentem. Velké předepnutí tak znamená malou, nebo žádnou trhlinu, a naopak malé předepnutí představuje velkou trhlinu. Pro měření této diplomové práce byly z finančních důvodů a z důvodů jednoduchosti použity místo senzorů akustické emise senzory zrychlení a tlakoměry, kterými laboratoř byla vybavena. Přestože akustická emise klasicky pracuje s frekvencemi řádově v rozmezí desítek kHz až po jednotky MHz, projevuje se i u frekvencí mnohem nižších. Využití dostupných snímačů tak je zcela v pořádku, nicméně jsme kvůli zvoleným snímačům omezeni frekvencemi zejména u snímačů zrychlení, a proto byla analýza záznamu prováděna pouze do frekvence 40 kHz.

Podařilo-li by se získat informaci o tom, jak je akustický projev vázán na trhlinu a podmínky buzení, získali bychom mocný nástroj pro kontroly a popřípadě kontinuální monitorování stavu strojů bez nutnosti demontování jednotlivých součástí.





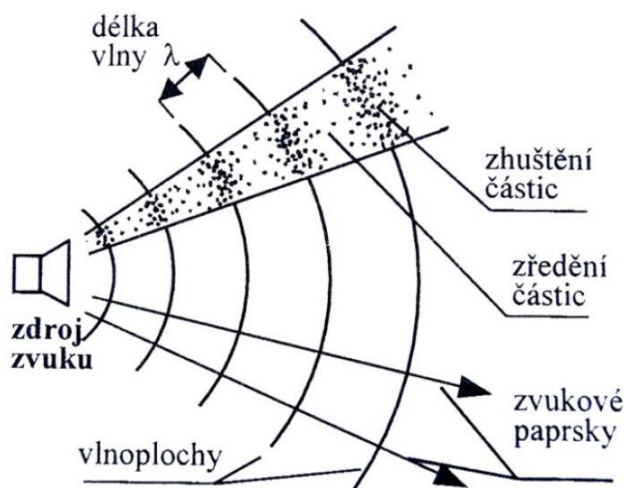


# 1 ZÁKLADNÍ POJMY Z AKUSTIKY

## 1.1 VIBRACE A KMITÁNÍ

Vibrace v pružném prostředí vznikají jako důsledek dynamických silových účinků, působících v určitých místech sledovaného média. Vibrace se pak dále šíří do zbývajících oblastí prostředí.

Pomocí mechanických kmitů pružného prostředí se přenáší mechanická energie kmitajících částic od zdroje pomocí akustických vln (Obr. 1). Vlnění se do zdroje šíří ve formě vlnoploch všemi směry rychlostí zvuku v daném médiu. Vlnoplochy jsou plochy, ve kterých jsou stejné akustické veličiny. Částice prostředí se v průběhu šíření vlny zhušťují, zředňují a kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Zásadně se nepohybují se šířící se vlnou. Podle směru kmitání vůči šíření vlny rozeznáváme kmitání podélné a příčné. U plynů a kapalin se vyskytuje pouze vlnění podélné, jelikož jsou tyto látky pružné pouze ve smyslu objemové roztažnosti. Vlnění podélné i příčné se vyskytuje u pevných materiálů, jelikož vykazují pružnost jak v tahu a tlaku, tak ve smyku. [1]



Obrázek 1.1 Vlnění v pružném prostředí [1]

## 1.2 AKUSTICKÁ EMISE

Akustická emise (dále jen AE) je dle normy ANSI/ASTM E610 fyzikálním jevem při kterém dochází k jednorázovému generování elastické napětové vlny tvořené skokovým uvolněním nahromaděného mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa. Podle platné normy ČSN EN 1330-9 je tento název používán pro elastické vlny vznikající následkem náhlého uvolnění energie v materiálu, nebo jiným procesem schopným způsobit vznik elastických napětových vln.

Pojem AE vznikl v 50. letech 20. Století při studiu plastické deformace kovů. Označuje jev, kdy plastickou deformaci kovů doprovází akustický šum vznikající uvnitř materiálu. Nicméně s tímto jevem se lidé setkávali již dříve. Například praskání větve při lámání, nebo křupání ledu při došlápnutí. Tyto zvuky tedy dávají informaci o stavu tělesa a první praktické využití tohoto jevu v průmyslu datujeme kolem roku 6500 př. N. l., kdy ji hrnčíři využívali jako prostředek ke zjištění jakosti keramických výrobků.



K určování kvality výrobků hrnčíři využívali slyšitelné praskání hliněných nádob chlazených v peci. Takto byli řemeslníci schopni odhalit a eliminovat vadné výrobky i bez vnějších známek poškození. Některé zvuky jsme schopni zaznamenat pouhým uchem a tedy i mikrofonom, jiné dokážeme odhalit kupříkladu akcelerometrem na povrchu tělesa. Důvodem je vysoká míra útlumu ve vzduchu zvýrazňující se u vyšších frekvencí. [2]

### 1.3 ÚTLUM AKUSTICKÝCH VLN [3]

Záznam akustické emise nebude při různých místech odběru stejný, tyto změny způsobuje útlum akustických vln. Zmíněné útlumy akustického vlnění vlivem šíření v materiálu můžeme rozdělit do 4 principiálně lišících se kategorií.

Prvním mechanismem je absorpce a vnitřní tření. Tento způsob útlumu spočívá v přeměně akustické energie na tepelnou energii materiálu. Vliv útlumu má logaritmickou závislost na vzdálenosti od zdroje akustické emise. Ztráty způsobené absorpcí jsou dále závislé na frekvenci, vyšší frekvence jsou utlumované více, než frekvence nízké.

Druhým mechanismem je geometrický rozptyl. Při šíření vlnění směrem od zdroje dochází k velkému růstu plochy, kterou vlnění prochází. Aby byla zachována velikost energie akustické emise, musí se amplituda vlnění zmenšit. Pro skupinový mód vlnění pak klesá velikost amplitudy nepřímo úměrně k vzdálenosti od zdroje akustické emise.

Třetím mechanismem zeslabení signálu je přesun části akustické energie do sousedního média. Tímto druhem útlumu může dojít k poklesu energie akustické vlny vlivem povrchového nátěru, nebo například kapaliny v nádrži. K tomuto mechanismu můžeme zařadit také rozptyl na nehomogenitách materiálu (různá natočení zrn, nebo přechody mezi maticí a pojívem kompozitů)

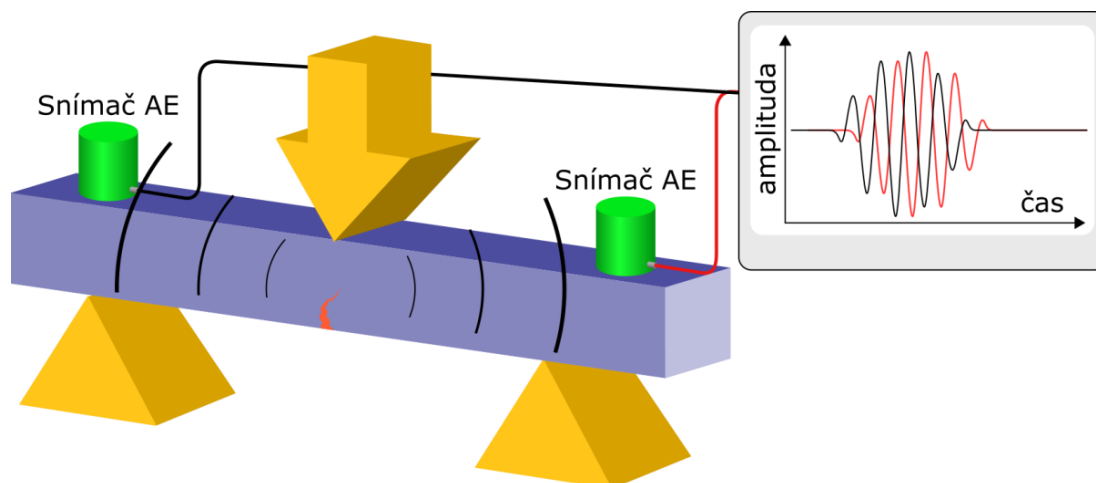
Čtvrtým a posledním mechanismem je rozptyl. Jeho podstatou je zmenšení amplitudy signálu vlivem nestejnoměrné rychlosti šíření různých frekvencí akustické vlny skrze materiál.

S těmito znalostmi je možno říct, že geometrický rozptyl je dominantním mechanismem útlumu pro blízká místa zdroji emise. Se zvyšující se vzdáleností jeho vliv klesá a naopak převažuje vliv útlumu absorpcí.

### 1.4 AKUSTICKÁ EMISE JAKO NDT METODA [4]

Metodu akustické emise řadíme mezi nedestruktivní metody zkoušek materiálů, přestože se liší od klasických nedestruktivních diagnostických technik (dále jen NDT). Odlišnost metody AE spočívá v diagnostice řady procesů, které nemají s porušováním a defekty nic společného.

Metoda AE detekuje a charakterizuje rozvoj procesu. Pracuje s odposlechem akustické aktivity emitované procesy probíhajícími v materiálu (plastické deformace, iniciace a rozvoje porušení, svírání a rozevírání trhlin, únik média skrze průchozí trhlinu, v hydraulice vznik tlakových vln a kavitace). Metoda AE detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu porušení a defektů.



*Obrázek 1.2 Schématický princip metody akustické emise*

Procesy jsou detekovány právě a pouze v průběhu rozvoje procesů – zdrojů AE. Řada procesů je nezvratných (vznik a šíření trhliny), pokud tedy v okamžiku rozvoje procesu – zdroje aktivitu AE nedetekujeme, zkoušku nelze v mnohých případech opakovat. Je tedy neopakovatelná. Tato metoda vyžaduje stimul rozvoje procesu – zdroje AE (plastickou deformaci, popřípadě porušení) čímž se od klasických NDT metod liší.

Kontrola celé součásti, či její části pomocí AE je zajištěna monitorováním sítí snímačů v rámci jedné zkoušky. Detekují se jak defekty vnější, vnitřní, tak i defekty uvnitř (nepřístupné) tělesa. Zajištění monitorování metoda AE nevyžaduje zpřístupnění kontrolované součásti zevnitř a měření se provádí z povrchu.

Akustická emise je všestrannou neinvazivní metodou vhodnou k získání informací o testovaném materiálu, nebo konstrukci. Využívá se pro vyšetřování a monitorování svarů, potrubí, tlakových nádob, skladových nádrží, zvedacích zařízení, mostů, letadel (především svarové spoje) a dalších keramických a kompozitních komponentů.

Monitorování svarů je možno díky podstaty mechanismu svaru. Během svařování je materiál podroben velkým teplotním změnám a tedy i teplotním dilatacím. Vychladnutí následně vyvolává vysoké mechanické napětí, které, pokud není svár temperován, se může projevit vznikem mikrotrhlin. Praskání materiálu může trvat až 10 dní po operaci. Standard ASTM E 749-96 pro monitorování svařování s užitím akustické emise má svůj původ v pokusech W. D. Jollyho. Ten při pokusech svařování nerezové oceli zjistil, že nízkoúrovňové impulzy jsou způsobeny růstem trhlin.

Kontroly tlakových láhví jsou také jedním z rozšířených diagnostických nástrojů využívající AE. Má totiž výhody nad hydrostatickými testy v ceně, rychlosti, pracnosti testů a mohou také odhalit i trhliny, které ještě neporušily povrch nádoby. Princip zkoušky nádoby spočívá v natlakování na 110% nominální hodnoty tlaku a soustavou senzorů se v případě úniku média nalezne kritické místo. Toto místo je následně zkontrolováno ultrazvukovou metodou. Podobným způsobem je možno monitorovat potrubí. Při úniku tekutiny je prouděním trhlinou vytvářen spojit akustický signál. Korelací signálu ze senzorů je možno vypočítat přesnou polohu trhliny.



## 2 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU

Data naměřená z experimentu jsou obecně ve formě hodnot měřených veličin v čase, tato forma však nevypovídá nic o kvalitách záznamu a změřených veličin. Proto jsou tato data zpracovávána různými metodami, pomocí nichž jsme schopni z daného měření vyvodit závěry.

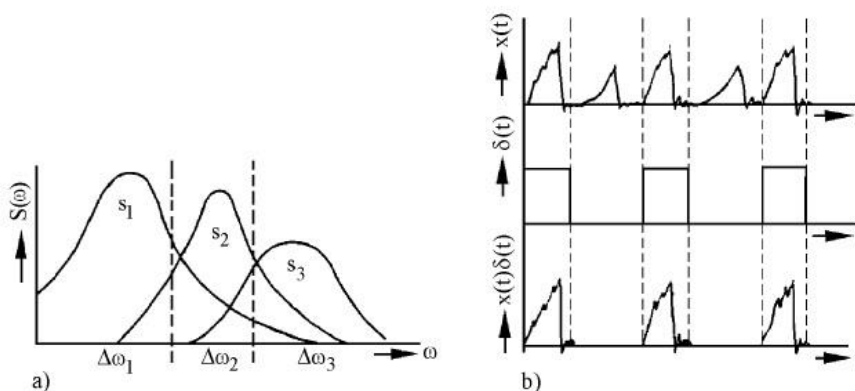
### 2.1 ZÍSKÁNÍ UŽITEČNÉHO SIGNÁLU

Nezpracovaná naměřená data mohou být zatížena chybou vlivem rušení (systematické chyby a odchylky měření nyní neřešíme). Je tak žádoucí relevantní data měření z tohoto záznamu izolovat než je začneme vyhodnocovat, jelikož by mohly podstatným způsobem ovlivnit výsledky analýz a následně také závěry.

V praxi se při měření setkáváme se signálem, ze kterého není patrná dominantní frekvence daného signálu. Jedním z důvodů je fakt, že většina zdrojů hluku tvoří tzv. harmonické frekvence (celočíselné násobky frekvence). Majoritními zdroji tohoto typu jsou: ložiska, převodovky, spalovací motory, kompresory aj. Dalšími elementy, které znesnadňují, měření jsou: okolní šum a samotný proces záznamu. [5]

Zdroje rušení mohou být různého původu i povahy. Může jít o mechanické rušení náhodné (například ruch lidí, šumění řeky apod.), popřípadě periodické (motor, nebo jiný rotační stroj) a rušení elektrické, které se projeví jako parazitní signál bez fyzikálního významu. V případě rušení elektrického dochází k indukci proměnlivého magnetického pole na vodiči měřícího senzoru například vlivem frekvenčního měniče. Přístupů, jak užitečná měřená data izolovat je několik a jsou ve své podstatě odlišné.

- Frekvenční filtrace – metoda využívá toho, že spektra signálu různých částí zcela nepřekrývají a je tak možné pomocí pásmového filtru propustit pouze část signálu (s částí šumu), která náleží frekvenční oblasti užitečného signálu.
- Časová selekce – Omezíme výběr užitečného signálu pouze na oblasti, kde je záznam měření v dostatečném odstupu od signálu šumu (Signal to noise ratio). V této oblasti šum jen velmi málo ovlivňuje záznam a z něho vycházející operace. [5]

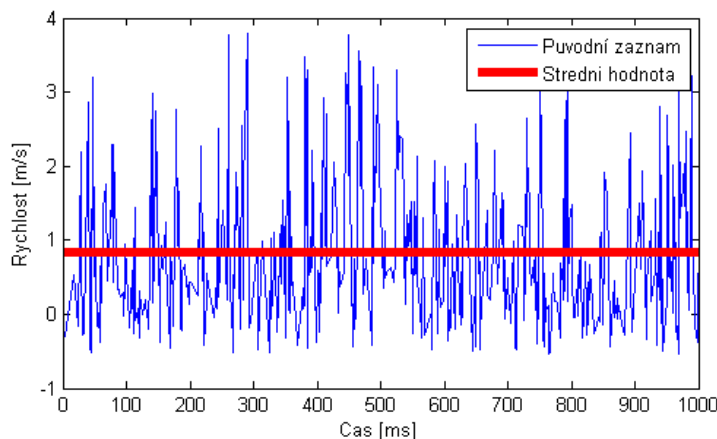


Obrázek 2.1 Příklady zpracování signálu. Frekvenční filtrace (a) a časová selekce (b). [5]



## 2.2 STŘEDNÍ HODNOTA

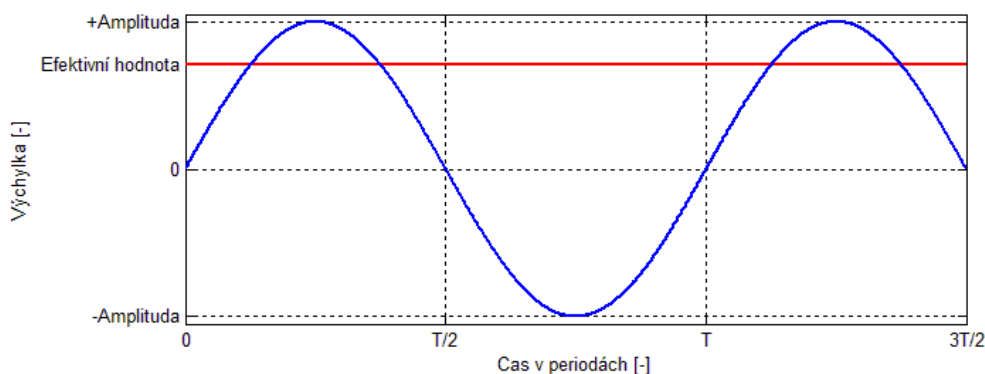
Pro časově proměnné veličiny, ať už jde o mechanickou, elektrickou, nebo jinou veličinu, se snažíme získat hodnotu, která by správně charakterizovala daný záznam. Důvodem je, že maximální, nebo špičková hodnota nemůže správně popsat jejich charakter. Jelikož jsou hodnoty měřené veličiny zaznamenávány v časovém úseku, je průměrná hodnota pro analýzu vhodnější než hodnoty okamžité. Tato operace se často užívá například u měření, kdy přes ustálený stav hodnota měřené veličiny neustále fluktuuje. Typickým představitelem může být záznam měření rychlosti pomocí metody LDA.



Obrázek 2.2 Záznam okamžitých hodnot a jejich střední hodnota

## 2.3 EFEKTIVNÍ HODNOTA RMS

Pro sinusoidní průběh symetrický kolem nulové hodnoty, tedy případ střídavého napětí v elektrické síti. Střední hodnota bude rovna nule. Tato hodnota nám nedává žádnou užitečnou informaci. Proto je definováno RMS (root mean square), jako efektivní hodnota časově proměnné veličiny. Ve své podstatě je RMS kvadratický průměr. Jde tedy o ekvivalent statické (časově neproměnné) veličiny se stejným efektem. [6]



Obrázek 2.3 Efektivní hodnota (červeně) periodického průběhu (modře)

Efektivní hodnota je nejdůležitějším parametrem popisující „velikost“ signálu. Termín velikost signálu je používán k reprezentaci síly signálu. V určitých aplikacích je zcela kritické znát tuto „velikost“, například chceme-li znát množství elektrické energie spotřebované některým ze spotřebičů. [6]



$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t)^2) dt} = \sqrt{\frac{x_0^2 + x_1^2 + \dots + x_{N-1}^2}{N}} \quad (1)$$

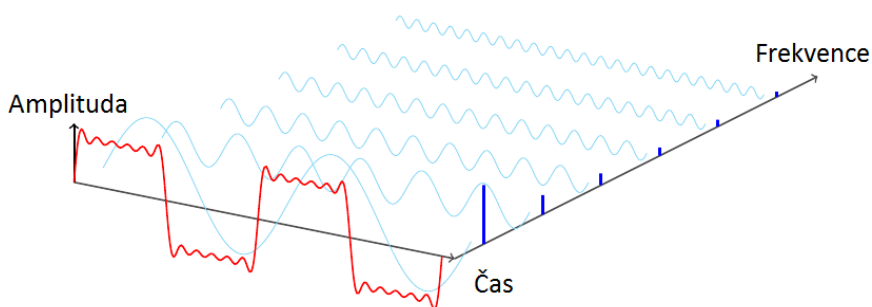
Tyto rovnice popisují vztah mezi efektivní hodnotou, spojitou veličinou závislou na čase v rozmezí od 0 po periodu  $T$  a mezi diskretním souborem hodnot  $x$  v celkovém počtu  $N$  vzorků záznamu.

## 2.4 FOURIEROVA TRANSFORMACE [7]

Fourierovy analýzy jsou skupinou matematických funkcí založených na rozkladu signálu na sinusoidy. Diskrétní Fourierova transformace (dále jen DFT) je funkcí používanou při zpracování digitálního signálu. DFT je jedním z nejvýznamnějších nástrojů v oblasti zpracování digitálního signálu z několika důvodů.

1. DFT dokáže vypočítat frekvenční spektrum signálu, což je přímé vyjádření informace zakomponované ve frekvenci, fázi a amplitudě dílčích sinusoid. (Tento typ kompozice signálu je využíván například u lidského hlasu k mluvení a poslouchání.)
2. Pomocí DFT jsme schopni zjistit frekvenční odezvu systému z impulzní odezvy systému apod. To umožňuje analýzu systémů ve frekvenční oblasti.
3. DFT je krokem předcházejícím k složitějším technikám zpracování signálu. Klasickým příkladem je konvoluce FFT, algoritmus pro konvoluci signálu, který je více než stokrát rychlejší, než konvenční metody.

Zvukový záznam jakéhokoliv fyzikálního děje je reprezentován časovými změnami hodnot sledovaných fyzikálních veličin. Mnohdy nás ale zajímá spíše zastoupení jednotlivých frekvenčních složek, proto je výhodné transformovat signál z časové oblasti do oblasti frekvenční podle prvního bodu.



Obrázek 2.4 Příklad časové a frekvenční oblasti zvuku [30] (originál upraven překladem)

V tomto případě se z grafu časové oblasti (vlevo) dozvíme pouze průběhu amplitudy veličiny v čase, nevíme však nic o jeho složení. Proto se signál transformuje do frekvenční oblasti (vpravo), ve které vidíme zastoupení jednotlivých frekvencí. Informace o zastoupení a amplitudách jednotlivých frekvencí jsou v oblasti diagnostiky pomocí akustické emise mnohem důležitější.



## 2.5 PARSEVALŮV TEORÉM [8]

Snažíme-li se vyhodnotit efektivní hodnoty jednotlivých frekvenčních oblastí, je jednodušší pracovat přímo s daty ve frekvenční oblasti. Po vybrání konkrétního rozsahu frekvencí, jehož efektivní hodnotu chceme získat, máme několik možností. První možností je zpětná Fourierova transformace a následné vyhodnocení předchozím vztahem. Druhou možností je využití tzv. Parsevalova teorému.

Pokud je možno signál reprezentovat ve frekvenční doméně jako  $X(f)$ , poté je možno pomocí Parsevalova teorému vypočíst efektivní hodnotu RMS pomocí následujícího vztahu.

$$E_{RMS} = \sqrt{\left| \frac{X(f)}{N} \right|^2} \quad (2)$$

Vzhledem k tomu, že signál v časové i frekvenční doméně reprezentuje stejný signál, musí mít také stejnou energii. Vztah mezi těmito energiemi je nazýván Parsevalův teorém a platí pro veškeré Fourierovské transformace (transformace z rodiny Fourierových transformací). Pro diskrétní Fourierovu transformaci je vztah vyjádřen následujícím výrazem:

$$\sum_{i=0}^{N-1} X[i]^2 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N/2} \text{Mag } X[k]^2 \quad (3)$$

Levá strana rovnice vyjadřuje celkové množství energie v časové doméně získané sumací energií  $N$  jednotlivých vzorků. Podobně pravá strana rovnice vyjadřuje množství energie obsažené ve frekvenční doméně sumací energií  $N/2 + 1$  sinusoid. Díky své povaze má Parsevalův teorém uplatnění nejen ve fyzice, ale také v digitálním zpracování signálu.



### 3 EXPERIMENT

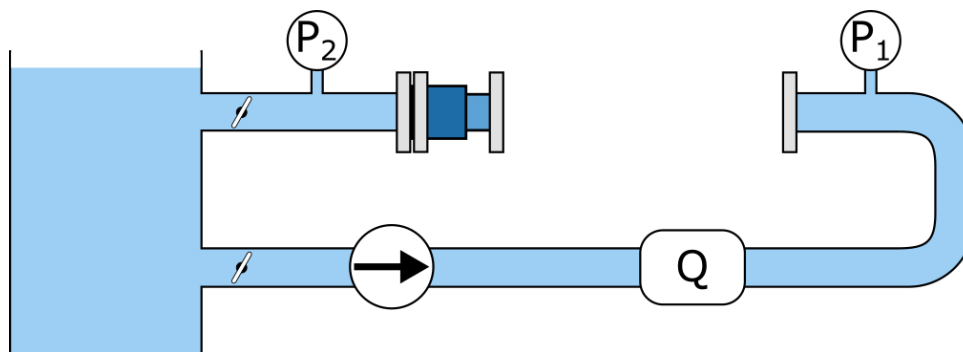
Jednou z hlavních částí této diplomové práce bylo provedení jednoduchého měřeného experimentu, na jehož základě měla být posouzena vhodnost použití diagnostiky pomocí metody akustické emise u hydraulických strojů. Tato kapitola je tak kvůli přehlednosti rozdělena do několika logických celků.

- Návrh experimentu
- Příprava experimentu
- Provedení experimentů
- Vytvoření programu pro vyhodnocení záznamu

#### 3.1 NÁVRH EXPERIMENTU A METODIKA VYHODNOCENÍ

Cílem práce bylo objasnění použitelnosti metody AE při sledování hydraulických strojů, zejména jejich nežádoucích stavů. Tyto stavy se mohou týkat jak hydraulického, tak mechanického původu. V případě hydrauliky je nežádoucím stavem převážně kavitace, kvůli svým destruktivním účinkům při kolapsu kavitačních bublinek v blízkosti povrchů pevných těles. Z mechanických důvodů se může jednat o kontakt těles, vnik nečistot do stroje, popřípadě jiné mechanické poškození. Je tedy vhodné tyto stavy sledovat z důvodu korektního určení stavu a životnosti částí z hlediska plánování odstávek a oprav strojů.

Experiment bude prováděn na měřicí trati kavitačního pavilonu laboratoří OFIVK, jejíž schéma je možno vidět na obrázku 3.1. V prováděném experimentu se zaměříme především na odhalení vzniku a projevu trhliny v součásti. Jelikož má jít o jednoduchý experiment a použití součástí reálných strojů a jejich záměrné poškozování je vyloučeno, bude tato trhlina a její vliv simulován. K simulaci trhliny poslouží šroub umístěný příčně v potrubí a jeho předepnutí vůči vnitřní stěně potrubí bude představovat stav růstu trhliny. Použití šroubu je také výhodné vzhledem k možnosti měnit předepnutí šroubu a tím také regulovat vliv trhliny. Utažený šroub tedy bude představovat těleso bez trhliny. Naopak šroub povolený, nebo s nižším předepnutím bude představovat těleso s trhlinou. Předepnutí není jediným parametrem, který budeme v průběhu experimentu měnit. Dále jsme schopni ovlivnit tlakový spád tratě pomocí klapky umístěné před vyústěním do nádrže s vodou. Přivřením klapky omezíme průtok, ale také vyvoláme protitlak, což může být v mnoha případech výhodné. Především omezíme vznik kavitace a jejího akustického šumu. Posledním měněným parametrem je průtok, který budeme řídit otáčkovou frekvencí čerpadla. Tuto frekvenci jsme schopni měnit s přesností na desetiny Hz díky použití frekvenčního měniče.

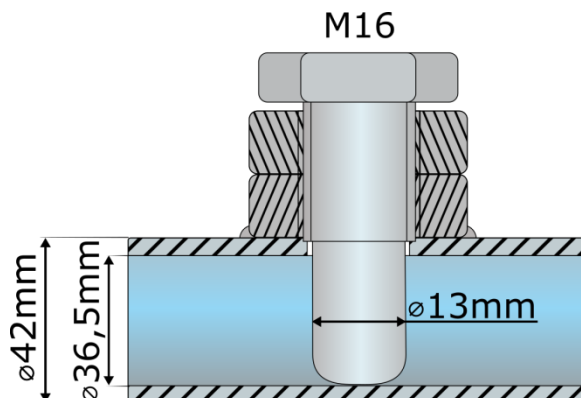


Obrázek 3.1 Schéma měřicí tratě, na které bude experiment proveden



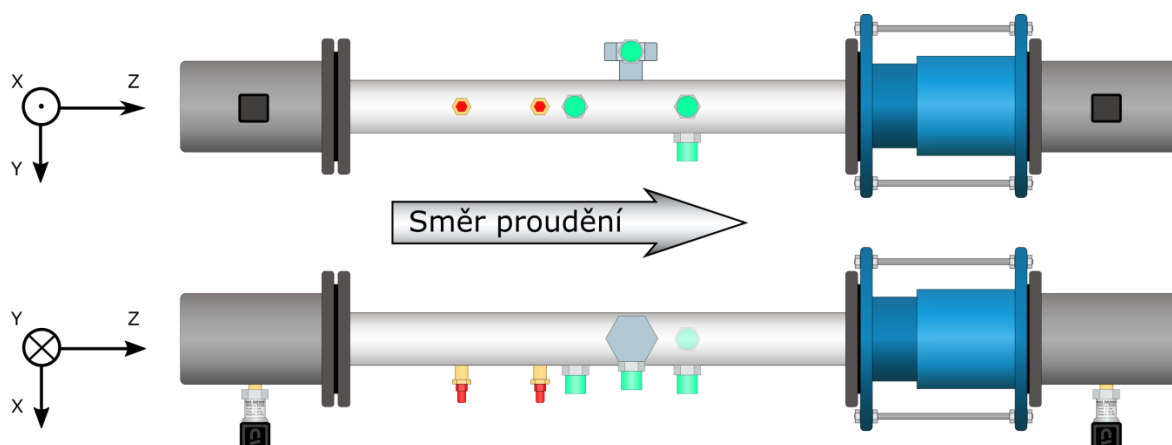


Mezi přírubami měřicí tratě bude umístěna trubice o průměru D42,5mm se šroubem M16x60. Ten bude opatřen odsazením na dřiku ve formě odstranění závitů až na hladkou válcovou plochu v délce vnitřního rozměru potrubí. Šroub bude umístěn ve vzdálenosti 2/3 délky trubice. Bude zde vyvrtána díra a na ni navařena matice z důvodu upevnění šroubu (svar by měl být nepropustný), bude v ní umístěno těsnění (při vysokých rychlostech je pravděpodobné nastání podtlaku a mohlo by docházet k přísávání vzduchu, což je nechtěným jevem, popřípadě při přivřené klapce může docházet k prosakování). Šroub bude v dané pozici jištěn tuhostní maticí, čímž zabráníme samovolnému uvolňování předpětí a pohybu z dané pozice.



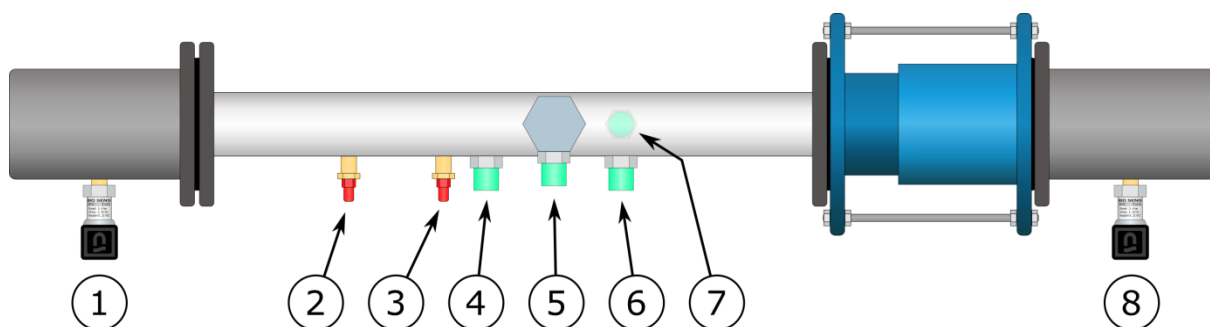
Obrázek 3.2 Schématický průřez měřeného tělesa

Experiment bude měřen pomocí soustavy snímačů rozmístěných dle následujícího schématu. Vývody těchto snímačů budou zapojeny do průmyslového počítače National Instruments NI PXIe-1078 vybaveného měřicí kartou NI PXIe-4492 a zaznamenávacím programem vytvořeném v softwaru LabView. Seznam těchto snímačů spolu s jejich rozsahy je uveden v seznamu použité měřicí techniky na následující stránce.



Obrázek 3.3 Pozice jednotlivých snímačů při měření experimentu.

Červeně jsou označeny „rychlé“ tlakové snímače, zeleně jsou označeny akcelerometry a černo-stříbrné jsou „pomalé“ tlakoměry. U pozic jednotlivých snímačů při měření experimentu je nutné podotknout, že toto uspořádání platí pouze pro první experiment. U druhého experimentu byla trubice se šroubem otočena proti směru proudění. Tato změna byla provedena z důvodu zjištění vlivu umístění snímačů na výsledky měření.



Obrázek 3.4 Obrázek odkazující na pozice snímačů v následujícím seznamu

#### Použitá měřicí technika

1. Snímač tlaku  $p_2$  DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-400 kPa abs., přesnost  $\pm 0,25$  %, proudový výstup 0 – 20 mA.
2. Piezoelektrický tlakový snímač 601C, výrobce Kistler Group Winterhur Switzerland, měřicí rozsah 0-250 bar, vlastní frekvence  $>215$  kHz
3. Piezoelektrický tlakový snímač 601C, výrobce Kistler Group Winterhur Switzerland, měřicí rozsah 0-250 bar, vlastní frekvence  $>215$  kHz
4. Piezoelektrický snímač zrychlení 352C03, výrobce PCB Piezoelectronics, měřicí rozsah  $\pm 500$  g, frekvenční rozsah 0,5 – 10 000 Hz při zkreslení  $\pm 5\%$ , 0,3 – 15 000 Hz při zkreslení 10%, vlastní frekvence  $>50$  kHz, napěťový výstup 10 mV/g.
5. Piezoelektrický snímač zrychlení 352C03, výrobce PCB Piezoelectronics, měřicí rozsah  $\pm 500$  g, frekvenční rozsah 0,5 – 10 000 Hz při zkreslení  $\pm 5\%$ , 0,3 – 15 000 Hz při zkreslení 10%, vlastní frekvence  $>50$  kHz, napěťový výstup 10 mV/g.
6. Piezoelektrický snímač zrychlení 352C03, výrobce PCB Piezoelectronics, měřicí rozsah  $\pm 500$  g, frekvenční rozsah 0,5 – 10 000 Hz při zkreslení  $\pm 5\%$ , 0,3 – 15 000 Hz při zkreslení 10%, vlastní frekvence  $>50$  kHz, napěťový výstup 10 mV/g.
7. Piezoelektrický snímač zrychlení 352C03, výrobce PCB Piezoelectronics, měřicí rozsah  $\pm 500$  g, frekvenční rozsah 0,5 – 10 000 Hz při zkreslení  $\pm 5\%$ , 0,3 – 15 000 Hz při zkreslení 10%, vlastní frekvence  $>50$  kHz, napěťový výstup 10 mV/g.
8. Snímač tlaku  $p_1$  DMP 331, výrobce BD SENSORS s. r. o. Uh. Hradiště, měřicí rozsah 0-1600kPa abs., přesnost  $\pm 0,25$  %, proudový výstup 0 – 20 mA
9. Indukční průtokoměr typ MQI99-C ELA Brno, DN100, měřicí rozsah 0-80 l/s, přesnost  $\pm 0,5$  % z měřené hodnoty, proudový výstup 4-20 mA.



### 3.2 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Jako základ experimentu byla vybrána trubice z pozinkované oceli o průměru 42,5 mm a délce zhruba 0,5 m. Přesná délka není tak důležitá, jelikož je měřicí trať vybavena axiálním vymežovacím členem, který je tak schopen měnit svou délku tak abychom trubici správně připevnili k přírubám. V trubici byla ve dvou třetinách své délky vyvrtána díra pro vložení šroubu a byla opatřena maticí připevněnou nepropustným svárem. Vkládaný šroub M20x65 byl upraven podle předlohy. Bylo na něm vytvořeno odsazení sražením závitu až na hladkou válcovou plochu v délce vnitřního průměru potrubí, tedy zhruba 37 mm. Toto sražení má za úkol eliminovat ovlivnění proudění vody kolem závitu na dřívku šroubu. Konec šroubu byl upraven také a to tak, že byl částečně zakulacen pro lepší dosednutí na vnitřní stranu trubice. Tyto části byly vyrobeny v dílně laboratoře OFIVK dle návrhu v předchozí podkapitole.

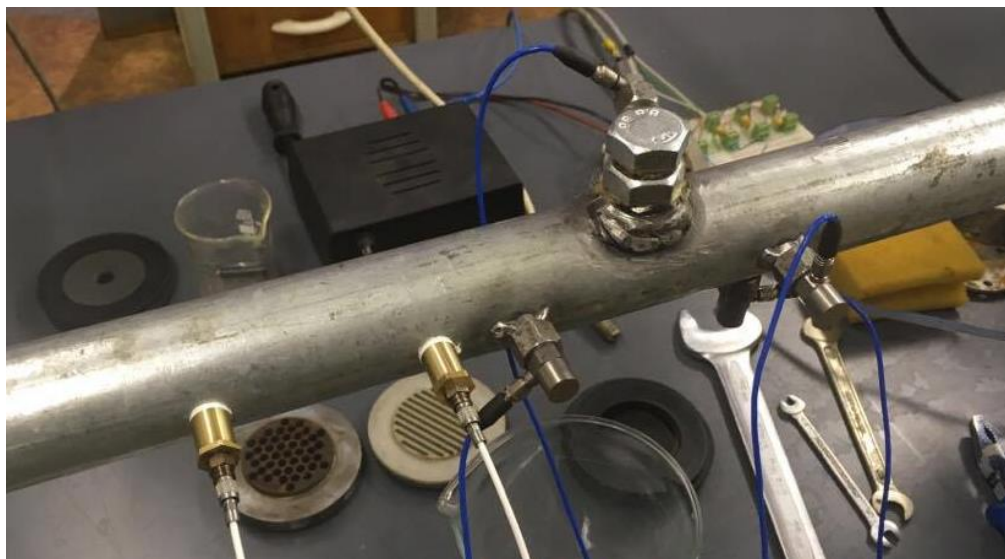


*Obrázek 3.5 Realizace úpravy šroubu pro potřeby měření*

Matice byla na trubici přivařena tak, aby byl svár nepropustný a závit byl opatřen kombinací konopného a teflonového těsnění. Hlava šroubu byla dále opatřena otvorem se závitem pro upevnění akcelerometru.



*Obrázek 3.6 Šroub umístěn do trubice, kde je připevněn přivařenou maticí*



*Obrázek 3.7 Umístění snímačů na trubici při prvním měření experimentu*

Na trubici byly také připevněny otvory pro tlakové odběry s přípravkem k upevnění tlakových snímačů Kistler (2 zlaté válečky na levé straně obrázku 3.7) a matice určené k upevnění akcelerometrů ve dvou vzájemně kolmých rovinách.

### 3.3 PROVEDENÍ PRVNÍHO EXPERIMENTU

Snímače byly zapojeny do průmyslového počítače a z experimentu byl prováděn záznam o délce 4 sekund při vzorkovací frekvenci 100 kHz. Měřicí karta má však pouze omezený počet vstupů a tak musel být tlakoměr umístěný za měřenou trubici sledován ampérmetrem. Jeho elektrická veličina byla zaznamenávána ručně a následně se pomocí přepočetního vztahu převedla na tlak.



*Obrázek 3.8 Záznam elektrické veličiny tlakoměru za trubici*

V rámci jednoho experimentu byly provedeny 4 měření. Tato měření se od sebe lišila různými kombinacemi předpětí šroubu a otevřenosti klapky.





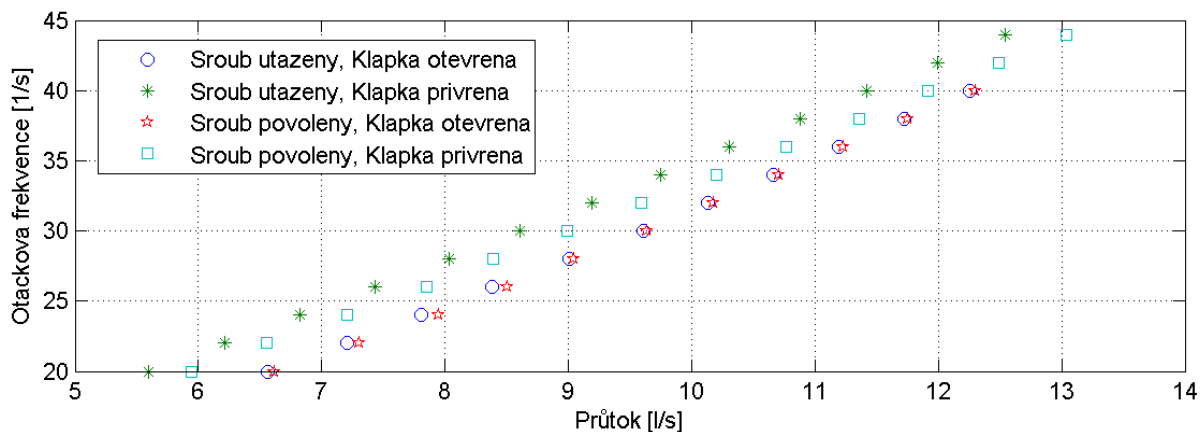
Předpětí šroubu v případě utaženého šroubu bylo vyvoláno momentovým klíčem. Utahovací moment byl dán minimální citlivostí momentového klíče na 40 Nm. V případě povoleného šroubu se jednalo o utažení pouze rukou. V obou variantách bylo předepnutí zajištěno pomocí tuhostní matice, kterou je možno vidět na obrázku 3.6.

Nastavení přivření klapky bylo provedeno pomocí pákového ovládání klapky, které bylo vybaveno jisticím mechanismem se západkami, čímž byly jasně definované jednotlivé stupně přivření. Tento mechanismus zabraňoval samovolnému přenastavení klapky. Nevýhodou však byl malý počet těchto jištěných pozic.



Obrázek 3.9 Detail klapky a jejího ovládacího mechanismu

V každém případě se během měření měnil průtok, který jsme z důvodu jednoduchosti nastavovali otáčkami čerpadla pomocí frekvenčního měniče. Tyto otáčky byly voleny s ohledem na průtočnost měřené části trati a rozsah akcelerometrů. Zvolen byl rozsah otáček od 20 Hz do 40 Hz, ve dvou případech pak byla horní mez posunuta na 44 Hz. Důvodem byla přivřená klapka, která svými tlakovými ztrátami snižovala průtok. Maximální otáčky čerpadla se tak zvýšily z důvodu přiblížení průtoků k hodnotám s plně otevřenou klapkou. Otáčkové frekvence postupně narůstaly s krokem 2 Hz za měřený bod. Tímto způsobem nemají jednotlivé body stejné průtoky, nicméně jsou odchylky malé a jsou tedy s malou nepřesností srovnatelné.

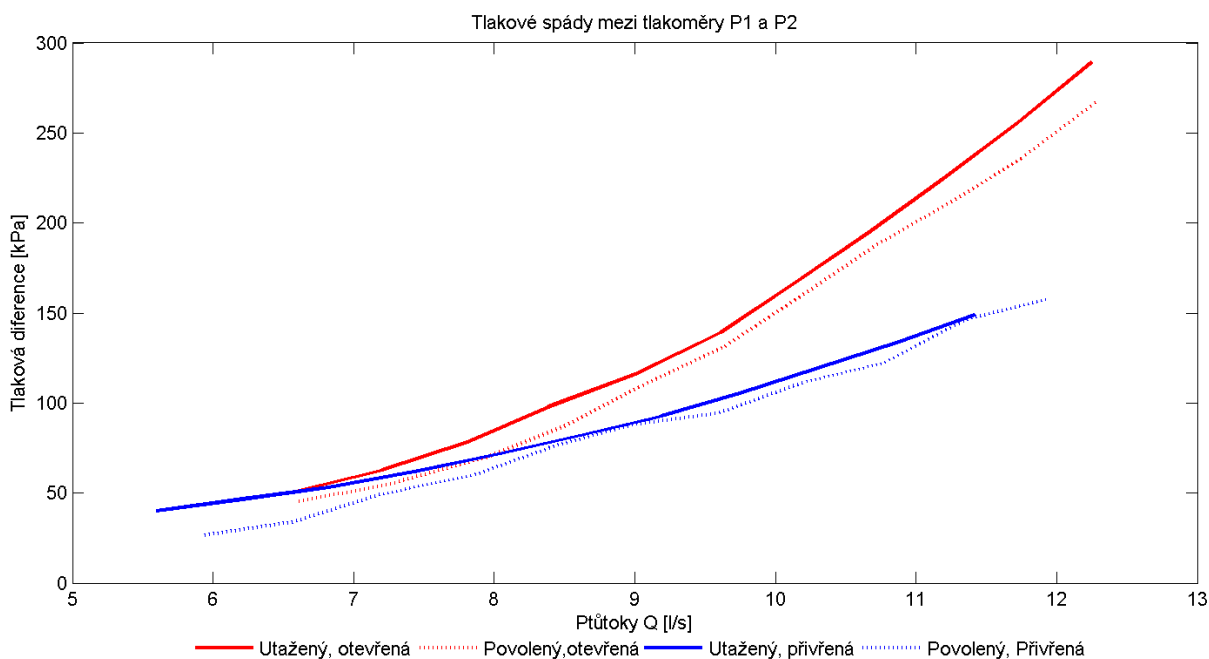


Obrázek 3.10 Vliv otáčkové frekvence na průtoky



Z tohoto obrázku je možno vidět ne zcela korektně zvolený měřený parametr otáčkové frekvence vzhledem k tomu, že chceme porovnávat stavy se stejným průtokem. Důvodem rozdílů mezi průtoky s plně otevřenou a přivřenou klapkou jsou jasné, přivřená klapka do okruhu vnáší další ztráty, a jejich vlivem snižuje průtok.

Další nesrovnalostí jsou rozdílné průtoky mezi utaženým a povoleným šroubem u přivřené klapky. Jelikož se tato měření neprováděla ihned po sobě a klapkou se mezi měřeními hýbalo, mohlo dojít vlivem vůle mezi pákou a klapkou k různému nastavení přivření, přestože byla páka nastavena do stejné polohy, jako u předešlého měření. Nejmenší vliv na průtok mělo rozdílné utažení šroubu, nicméně určitý vliv má. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o změnu předepnutí a šroub se tak stále dotýká vnitřní strany trubice, se průtočný průřez nemění. Navíc rozdíly v průtocích nejsou během měření konstantní a maximum se pohybuje v oblasti mezi 7,5 až 8,5 l/s. Porovnávané hodnoty průtoků tedy nejsou zcela stejné, nicméně jejich odchylky jsou menší, než půl litru za sekundu. Vyřadíme-li okrajové body, které nespádají do ucelené skupiny měřených bodů, máme 11 použitelných bodů, které jsme schopni porovnávat.



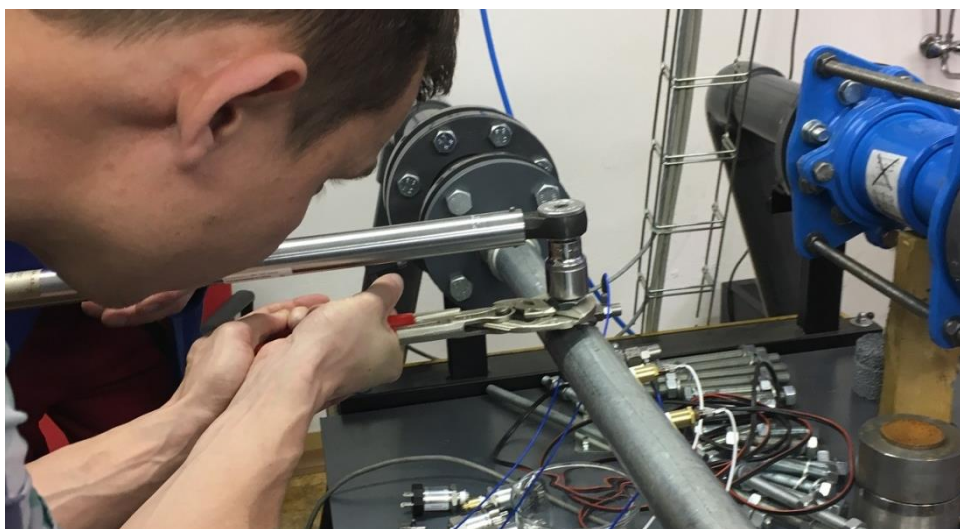
Obrázek 3.11 Tlakové spády na měřené trubici

Z obrázku 3.11 můžeme vidět rozdílné tlakové spády vlivem změny předepnutí a vlivem přivření klapky. Vlivem změny předepnutí dochází k změně tlakového spádu řádově v desítkách kPa. Vlivem přivření klapky na výtok z měřicí trati dochází vlivem protitlaku k snížení tlakového spádu mezi tlakovými snímači.



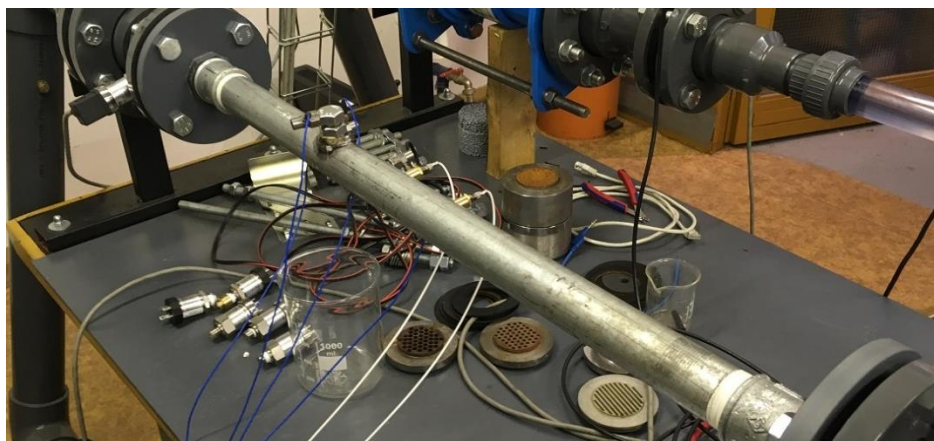
### 3.4 PROVEDENÍ DRUHÉHO EXPERIMENTU

Motivací k provedení dalšího experimentu byla zejména otázka, zda má vliv orientace trubice a k ní přidělaných snímačů. Pokud ano, pak jak velký tento vliv je. Před samotným provedením experimentu bylo rozhodnuto, že tento experiment neprovedeme stejně jako minulý, ale postup pozměníme. Změna spočívá v odlišném měněném parametru. Tentokrát nešlo o změny kombinací přivření klapky a předepnutí šroubu, ale jen o změny předepnutí šroubu. V tomto případě byl šroub s využitím momentového klíče dotažen utahovacím momentem 100 Nm. Je však nutno zmínit, že tato hodnota nebyla celá využita k vytvoření předpětí mezi šroubem a trubicí. Důvodem je neznámá velikost tření vlivem konopného těsnění. Jde však o dost vysoký utahovací moment, pro představu typický utahovací moment pro dotahování šroubů kola automobilu se pohybuje kolem 90-110 Nm.



*Obrázek 3.12 Ing. Hudec při utahování šroubu momentovým klíčem*

Můžeme tak s jistotou říci, že takovéto předepnutí simuluje jednotné těleso dostatečně. Zbývajících průběh měření probíhal velice podobně, jako v prvním případě. Průtok byl řízen pomocí otáčkové frekvence čerpadla a byl regulován frekvenčním měničem. Co se měřicího vybavení týče, jde o naprosto shodnou konfiguraci jako v minulém experimentu, jen je spolu s trubicí otočena.



*Obrázek 3.13 Orientace měřené trubice se snímači po změně směru proudění*



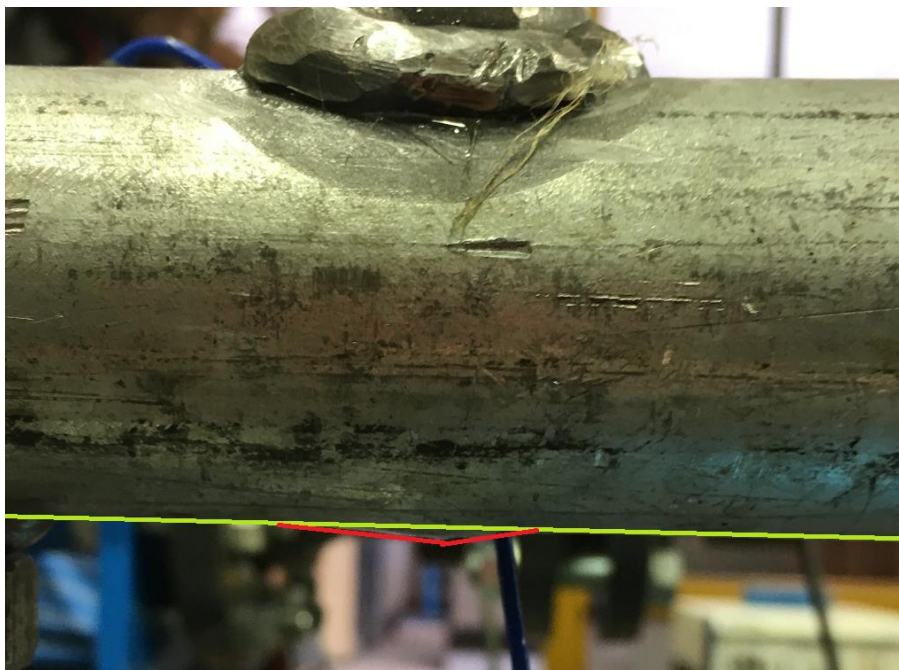


Po nastavení prvotního předepnutí šroubu na 100 Nm, byl šroub postupně po každém měřicím cyklu uvolňován. V tomto případě již ale nebyl měněn utahovací moment, ale o uvolňování bylo prováděno o úhel otočení šroubu. V každém povolovacím kroku tak byl šroub uvolněn o  $30^\circ$ , měření pokračovalo tak dlouho, dokud nebyl šroub zcela volný. V tomto bodě bylo provedené měření využito pro porovnání s původně orientovanou trubicí. Zjišťoval se tak vliv umístění zejména tlakových snímačů. Uvolňování založené na pootočení šroubu o určitý úhel není vzhledem k prvotnímu utahovacímu momentu zcela správné, ale z důvodu omezení minimálního utahovacího momentu momentového klíče je to jediný přesný způsob povolování.



*Obrázek 3.14 Ilustrativní fotky jednotlivých natočení šroubu během měření  
(zleva původní hodnota, povolání o  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  a  $90^\circ$ )*

Zde je vhodné zmínit, že během utahování šroubu momentovým klíčem došlo vlivem velkého předepnutí šroubu k deformaci dosedací části trubice.



*Obrázek 3.15 Deformace trubice vlivem velkého předepnutí šroubu.*

Na této fotce můžeme vidět deformaci vzniklou předepnutím šroubu. Žlutě je zvýrazněná původní linie trubice a červená kontura zviditelňuje vzniklou deformaci. Jedná se o poměrně zanedbatelnou deformaci vzhledem k rozměru trubice. Přestože tedy došlo k tomuto prohnutí, neměla by tato změna mít zásadní vliv na průtočný průřez a tedy ani na tuto sadu měření.





### 3.5 TVORBA PROGRAMU PRO VYHODNOCENÍ

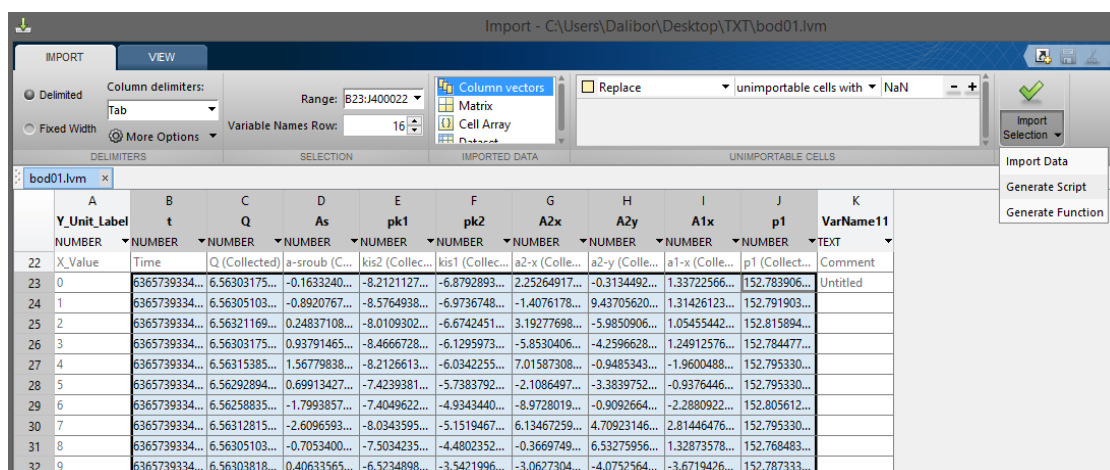
Výstupem měření je skupina textových souborů s naměřenými hodnotami veličin. Jelikož se každé měření sestává z většího množství měřených bodů a všechny tyto body je potřeba vyhodnotit, je nutná jistá úroveň automatizace. Ta bude provedena pomocí programu MATLAB, ve kterém bude vypracován m-file s posloupností příkazů jimiž bude vyhodnocení prováděno.

```
Channels 9
Samples 400000 400000 400000 400000 400000 400000 400000 400000
Date 2017/03/23 2017/03/23 2017/03/23 2017/03/23 2017/03/23 2017/03/23 2017/03/23 2017/03/23
Time 12:25:48.000 09:15:41.8451 09:15:41.8451 09:15:41.8451 09:15:41.8451 09:15:41.8451 09:15:41.8451 09:15:41.8451
Y_Unit_Label s l/s g kPa kPa g g kPa
X_Unit_Label s s s s s s s s
X_Dimension Time Time Time Time Time Time Time Time
X0 0 0 0 0 0 0 0 0
Delta_X_1 9.999999979627e-006 9.999999979627e-006 9.999999979627e-006 9.999999979627e-006 9.999999979627e-006 9.999999979627e-006 9.999999979627e-006
***End_of_Header***
X_Value Time Q (Collected) a-sroub (Collected) kis2 (Collected) kis1 (Collected) a2-x (Collected)
0 63657393341.8451 6.56303175911307 -0.163324085282691 -8.2121127181583 -6.87928937321944 2.25264917720448
1 63657393341.8451 6.56305103749037 -0.892076717973246 -8.57649381551365 -6.97367482905765 -1.40761787241155
2 63657393341.8451 6.56321169063449 0.248371083059429 -8.01093020457108 -6.67424510708816 3.1927769834345
3 63657393341.8451 6.56303175911307 0.937914652098353 -8.46667281876401 -6.12959730253517 -5.8530406518416
4 63657393341.8451 6.56315385550261 1.56779838687598 -8.21266133906478 -6.0342255827906 7.01587308536876
5 63657393341.8452 6.56292894110084 0.69913427525587 -7.42393810645784 -5.73837928634753 -2.10864977403121
6 63657393341.8452 6.5625883564353 -1.79938573405576 -7.40496227745731 -4.93434407442308 -8.97280194542625
7 63657393341.8452 6.56312815099955 -2.60965936959035 -8.03435954445948 -5.15194676762862 6.13467259840532
8 63657393341.8452 6.56305103749037 -0.705340026337423 -7.50342359426107 -4.48023529647351 -0.366974960673939
9 63657393341.8452 6.56303818523884 0.406335656044414 -6.5234898398376 -3.54219969513891 -3.06273048574274
10 63657393341.8452 6.56283897534013 1.72124968634711 -6.56279691419583 -3.51008036725527 -0.531158664009788
11 63657393341.8452 6.56310244649649 1.2850135932734 -6.1005031209432 -2.45523824394464 4.28855419158936
12 63657393341.8452 6.56290323659778 -0.176581826229645 -4.93574866467277 -7.8256834637035 -7.8256834637035
13 63657393341.8452 6.56290323659778 -1.13889636326229 -4.11391454676899 -1.43665775692434 2.70225784995339
14 63657393341.8452 6.56312815099955 -1.8405693548697 -3.55490211488612 -1.10431969594612 2.17773697529995
```

Obrázek 3.16 Ilustrační výřez ze souboru naměřených dat

#### 3.5.1 AUTOMATICKÉ NAČÍTÁNÍ SOUBORŮ

Prvním krokem je tedy postupné automatické načítání jednotlivých souborů se záznamem měření, které je v tomto případě provedeno pomocí předpřipraveného příkazu Import Data. Pomocí tohoto příkazu se po nastavení rozsahu importovaných dat a jejich pojmenování vytvoří skript, po jehož spuštění se vybraná data načtou do Workspace MATLABu k dalšímu zpracování.



Obrázek 3.17 Dialogové okno importu dat a zvýraznění možnost vytvoření skriptu

V této fázi však skript zatím dokáže načíst pouze jeden soubor s pevně daným jménem a umístěním. To jsme schopni změnit kombinací *for* cyklu, nahrazením názvu souboru maticí názvů souborů a příkazem k vytvoření cesty k souboru kombinací názvu importovaného souboru a umístění složky obsahující tyto soubory. Tuto úpravu ilustruje obrázek 3.18.



```
clear all
clc
souboryx={'bod01' 'bod02' 'bod03' 'bod04' 'bod05' 'bod06' 'bod07' 'bod08' 'bod09' 'bod10' 'bod11' ...
'bod12' 'bod13' 'bod14' 'bod15' 'bod16' 'bod17' 'bod18' 'bod19' 'bod20' 'bod21' 'bod22' 'bod23' 'bod24' ...
'bod25' 'bod26' 'bod27' 'bod28' 'bod29' 'bod30' 'bod31' 'bod32' 'bod33' 'bod34' 'bod35' ...
'bod36' 'bod37' 'bod38' 'bod39' 'bod40' 'bod41' 'bod42' 'bod43' 'bod44' 'bod45' 'bod46' 'bod47' 'bod48'};
freks = (1:40); %rozsah analýzy RMS v kHz (1= 0-0,999kHz;1= 1-1,999kHz) fs je 100kHz tzn Nyquistova frekvence je 50kHz
rozsahy=[1 11 25 35 14 24 37 47]; %první čtyři jsou hranice s otevřenou klapkou a další s přivřenou
for MERENI=1:4 %1:2 znamená pouze měření s otevřenou klapkou
    rozsah=(rozsahy(2*MERENI-1):rozsahy(2*MERENI))

    freqs(:, :,MERENI)=repmat(freks,length(rozsah),1); %vytvoření meshgridu frekvencí
    soubory=souboryx(rozsah);
    p2s=p2xs(rozsah);
end

%% Initialize variables.
for i=1:length(soubory);
    tic
    soubor=char(soubory(i));
    formatSpec = 'Zpracovává se soubor %s.\n';
    fprintf(formatSpec,soubor)%Výpis co se zpracovává
    a1='C:\Users\Dalibor\Desktop\TXT\'; %umístění zdrojových souborů
    a2='.lvm';
    filename=strcat(a1,soubor,a2); %spojení umístění
    delimiter = '\t';
    startRow = 23;
end
```

Obrázek 3.18 Část skriptu s automatizací načítání souborů

Jak je zřetelné z tohoto obrázku, tento skript má databázi názvů jednotlivých souborů měření „souboryx“ ve formě *Cell array* (ta umožňuje uchovat text) a v číselné řadě „rozsahy“ jsou hranice jednotlivých měření. V každém *for cyklu* tak program přistoupí k názvu souboru podle rozsahu a pomocí příkazu *strcat* se zkombinuje cesta s názvem souboru a zapíše se do buňky „filename“ kterou využívá skript pro import souboru. V této fázi tak program dokáže postupně importovat všechny soubory ve složce podle seznamu „souboryx“. Takto načtená data můžeme dále zpracovávat.

### 3.5.2 ZÍSKÁNÍ STŘEDNÍCH HODNOT ZÁZNAMU

Druhým rokem při vyhodnocování záznamů je získání středních hodnot veličin, jako jsou: průtok a tlaky „pomalých“ tlakoměrů. U průtoku a prvního tlaku se využilo jednoduchého příkazu pro získání střední hodnoty *mean*. Vzhledem k tomu, že byl druhý tlakoměr zaznamenáván pomocí ampérmetru, docházelo k určitému středování již při záznamu. Hodnota tlaku se přepočítla z vložené databáze ručně zapsaných proudů pomocí přepočetniho vztahu. Ten jsme získali z rozsahu tlaků a rozsahu výstupního proudu snímače. Lineární interpolací okrajových hodnot tak získáme změřený tlak.

```
p2xs=[8.1143 8.1222 8.1304 8.1379 8.1444 8.1545 8.1615 8.17 8.18 8.1888 8.2 ... %první mereni
9.88 10.306 10.787 11.294 11.845 12.42 13.06 13.7 14.36 15.08 15.81 16.6 17.38 ... %druhe
8.116 8.124 8.133 8.14 8.14 8.155 8.163 8.171 8.1795 8.188 8.196 ... %treti
9.4192 9.727 10.08 10.453 10.816 11.224 11.67 12.136 12.615 13.13 13.66 14.26 14.98]; %čtvrté mereni mA

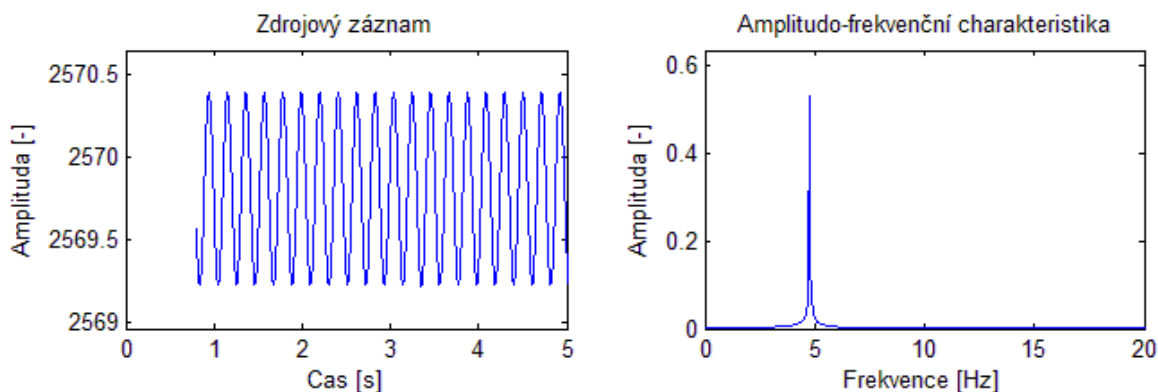
P2(i)=(p2s(i)-4)/16*400; %přepočet z elektrické veličiny na tlak v kPa
```

Obrázek 3.19 Přepočet elektrického výstupu snímače na tlak



### 3.5.3 FOURIEROVA TRANSFORMACE

Dalším logickým krokem ve vyhodnocování záznamu je Fourierova transformace. Jelikož se snažíme zjistit, zda je mezi záznamy nějaký sledovatelný rozdíl a jestli se pomocí tohoto rozdílu dá odhalit typ vady, který jsme simulovali (například změnou významných frekvencí), musíme záznam podrobit nějaké analýze. Samotný záznam v časové oblasti nám o charakteru projevu a jeho zdrojích moc neřekne. Fourierovou transformací získáme informace o velikosti a zastoupení jednotlivých frekvencí.

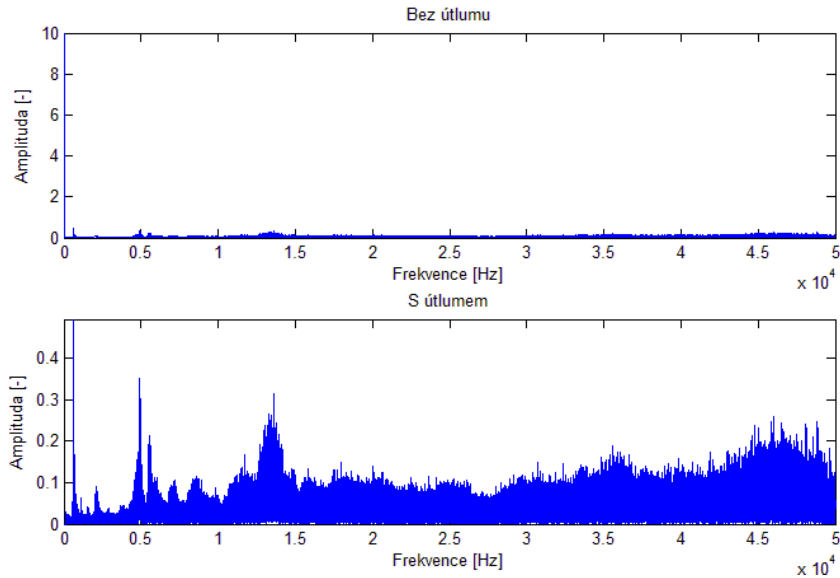


Obrázek 3.20 Ilustrace Fourierovy transformace

Z obrázku 3.14 je jasně vidět výhoda využití Fourierovy transformace v tomto případě jde pouze o ideální ilustrativní případ bez rušení ať už jiných periodických signálů, nebo náhodného rušení.

Jelikož se jedná o poměrně zásadní funkci používanou nejen v mechanice, ale také v elektrotechnice a vůbec digitálním zpracování dat je implementace v MATLABu velice dobrá. V základní formě totiž nefunguje jako diskrétní Fourierova analýza, ale sama pomocí implementovaných algoritmů rozdělí záznam na části tak, aby bylo možno použít schéma rychlé Fourierovy transformace a výpočetní čas se co nejvíce snížil.

Jednou z důležitých úprav vyhodnocení ve frekvenční oblasti bylo vynulování amplitud nízkých frekvencí. Tento krok je důležitý, jelikož mohou být frekvence blízké nule několikanásobně vyšší než frekvence vyšší a vlivem změny měřítka zbytek spektra zcela zneviditelný. Tento jev je u analýzy reálného signálu častý a mnohdy bývá amplituda frekvence v nule, nebo blízko nuly několikanásobně větší, než zbytek užitečného signálu. Tato operace se provede jednoduše položením hodnot daného rozsahu v matici amplitud nule. Rozsah hodnot získáme vyhledáním hraniční frekvence v matici frekvencí  $f$ , nebo přepočtem vztahem určeným z vzorkovací frekvence a délky záznamu.



Obrázek 3.21 Porovnání FT akcelerometru bez a s odstraněním amplitud nízkých frekvencí

Na tomto obrázku je zřejmý vliv odstranění amplitud v rozmezí 0 až 10 Hz, tyto frekvence změnou měřítka zakryjí ostatní vrcholy významných frekvencí. Svou velikostí je ale schopna tato oblast také změnit výsledky efektivních hodnot, kterými se práce bude zabývat v následující podkapitole. Příklad na obrázku je ale výjimečným případem a obrovský nárůst amplitudy nízkých frekvencí je v tomto případě možno přisoudit přetížení snímače.

$$b_{tr} = \frac{N}{F_S} \cdot f_{tr} \quad (4)$$

(5)

Vzorec pro výpočet hraničního bodu pro útlum.  $b_{tr}$  je hraničním bodem pro útlum frekvencí,  $F_S$  je vzorkovací frekvence,  $N$  je počet bodů záznamu a  $f_{tr}$  je hraniční frekvencí po kterou chceme útlum provést.



### 3.5.4 EFEKTIVNÍ HODNOTA RMS

V této fázi vyhodnocování záznamu experimentu bylo rozhodnuto, že Fourierova transformace je nástroj vhodný pro analýzu změn ve frekvenční odezvě systému, není však vhodná pro automatické vyhodnocení a kontrolu. Analýza frekvenční odezvy je vhodná pro laboratorní podmínky, jelikož je potřeba obsluha s určitým stupněm vědomostí. Pro toto automatické sledování je vhodnější posuzování na základě porovnávání čísel. Konkrétně čísla, které by reprezentovalo kontrolovaný záznam vůči hodnotě se známým stavem. V případě odchylky by tak došlo k varování obsluhy stroje a zabránilo se případné hrozbě havárii popřípadě upozornit na nutnost plánování odstávky a následné inspekce stroje. Touto hodnotou by mohla být právě efektivní hodnota RMS. Tato funkce je do vytvářeného programu implementována pomocí následujícího vzorce.

$$E_{RMS} = \sqrt{\left| \frac{X(f)}{N} \right|^2} \quad (6)$$

Tento vzorec však neodpovídá klasickému vzorci pro výpočet efektivní hodnoty, pracujeme totiž ve frekvenční oblasti kvůli jednoduchosti úprav a klasický vztah pro výpočet RMS bere hodnoty z oblasti časové. Tento vztah vychází z Parsevalova teorému zmíněného v kapitole 2.5 a umožňuje získat vztah, mezi energií spektra v časové a frekvenční oblasti. Druhým možným způsobem pro výpočet RMS z časové oblasti by bylo použití zpětné Fourierovy transformace a následné využití klasického vzorce z kapitoly 2.5. Tento způsob by však byl při dosažení stejných výsledků značně neefektivní z důvodů dvojnásobného počtu operací.

Než však data z FT vstoupí do výpočtu RMS, jsou upravena odsazením nenulových frekvencí zmíněných v minulé podkapitole, v tomto případě však nastává mírná komplikace v podobě podoby Fourierovy transformace. Ta je ze své podstaty symetrická, ale pro normální účely se používá pouze její polovina. Pro správný výpočet musíme sumaci v rovnici č. 5 provést přes všechny hodnoty FT. Je nutno tak položit nule také hodnoty v odpovídajícím rozsahu na druhé straně symetrické řady. Toto řešení v programu je možno vidět na následujícím obrázku.

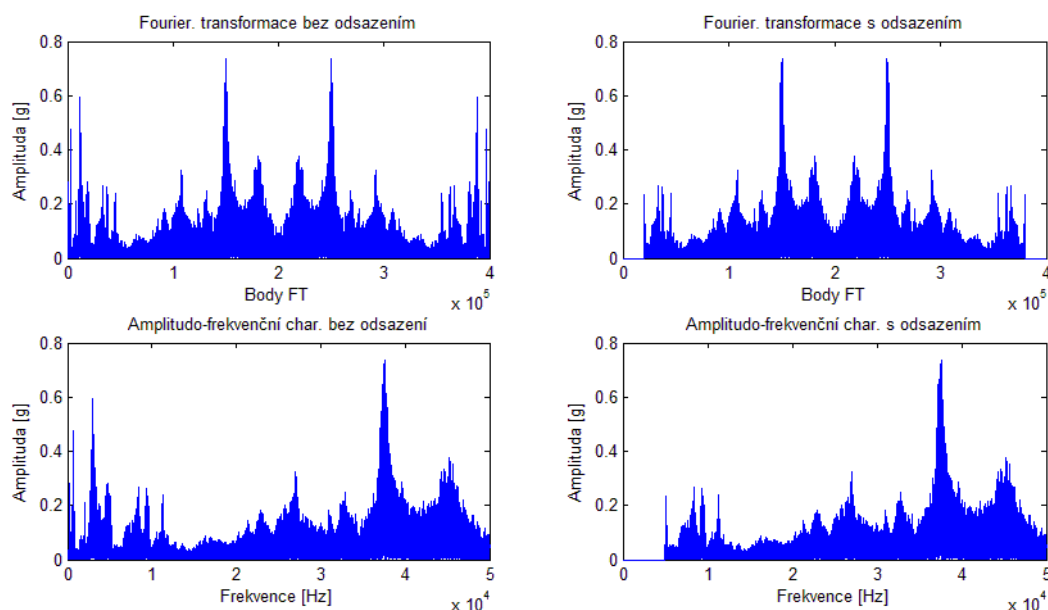
```
%% FFT a RMS z jednotlivých záznamů
for prom=1:6;
    promenna = dataArray(:, 2+prom);
    FT=fft(promenna);
    frek=100; %Hz - Tohe je velikost frekvenčního "odsazení"
    pomer=round(delta/v_freq);
    Bod_start=(frek)*pomer;
    Bod_stop2=delta-Bod_start;
    FT(1:Bod_start)=0;
    FT(Bod_stop2:end)=0;

    RMS(i,prom) = sqrt(sum(abs(FT/length(FT)).^2));
end
```

Obrázek 3.22 Detail skriptu zabývající se odsazením dat pro výpočet RMS



Z tohoto obrázku je zřejmé, že jde o *for cyklus* a je prováděn pro každý snímač samostatně. Během každého průběhu se tak provede Fourierova transformace, v ní se podle předpisu vynulují hodnoty do 100 Hz. Jelikož se přesnost FT mění v závislosti na délce záznamu a vzorkovací frekvenci, je nutno pozici hraniční buňky získat výpočtem. Hraniční body tak program získá součinem zadané okrajové frekvence a konstanty zde nazvané „pomer“. Vzhledem k symetrické povaze Fourierovy transformace je nutno okrajové body nulovat symetricky což dokazují následující obrázky.

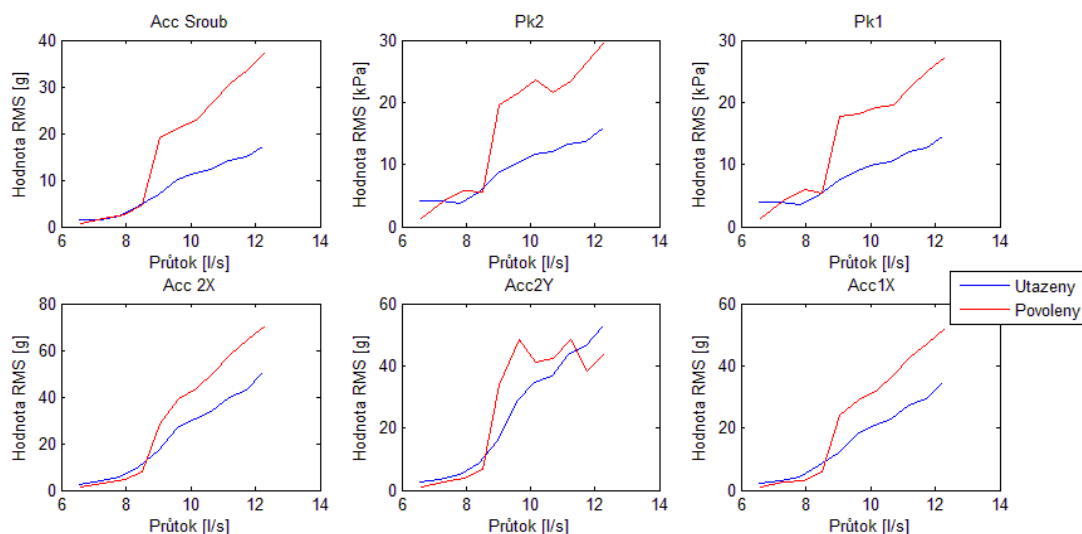


Obrázek 3.23 Ilustrační čtveřice grafů Fourierovy transformace s a bez odsazení

Na horních dvou grafech je možno vidět symetrickou povahu Fourierovy transformace, přičemž obrázek vlevo ukazuje výstup z FT. Čistý výstup z FT je ve formě komplexních čísel a tak byl pro ilustrační záměry vyneseno jako absolutní hodnota vydělená počtem bodů analýzy. Na ose x tak nejsou kmitočty jednotlivých frekvencí, jelikož přesnost amplitudo-frekvenční charakteristiky je závislá na vzorkovací frekvenci a počtu bodů analýzy. Této přesnosti se říká frekvenční krok a vyjadřuje, jak velké frekvenční pásmo zastupuje jeden bod grafu. Je na první pohled jasné, že horní dva grafy jsou symetrické, nicméně pro výstup do amplitudo-frekvenční charakteristiky je potřeba pouze její polovina. Oba pravé obrázky pak znázorňují frekvenční odsazení.

Výstupem této části kódu jsou tedy grafy s křivkou RMS hodnot tlaků, nebo zrychlení (podle zvoleného senzoru). Tyto křivky jsou závislé pouze na průtoku a jsou vypočítávány z celého spektra. Pomocí nich bychom tak měli být schopni odhalit nadměrné vibrace, popřípadě tlakové pulzace, které by byly nad rámcem normálního provozu. Tyto průběhy je možno vidět na následujícím obrázku.





Obrázek 3.24 Grafy s RMS křivkami naměřených hodnot z celého frekvenčního spektra

Na těchto obrázcích je jasně viditelný vliv rostoucího průtoku na RMS hodnoty snímače. Téměř ve všech případech je také vidět vliv předepnutí šroubu, nicméně v určitých oblastech jsou průběhy rozporuplné. V této kapitole mají grafy pouze ilustrativní význam a interpretace výsledků budou diskutovány a podrobně rozebírány v následující kapitole.

### 3.5.5 ŠKÁLOVANÉ RMS DLE FREKVENCÍ

Důvodem k dalším úpravám a podrobnější analýze je fakt, že v některých případech docházelo k přetěžování snímačů zrychlení a jejich projev nám znemožňoval použití klasického RMS z celého spektra frekvencí. Toto řešení je tedy evolucí předchozího řešení. Dále komplikuje zpracování dat a zvyšuje výpočetní náročnost, nicméně jsme pak schopni vidět, jak moc která frekvence přispívá do celkové hodnoty RMS z minulé podkapitoly. Můžeme tak eliminovat nežádoucí rušivé frekvence a porovnávat jejich velikosti mezi různými měřeními body.

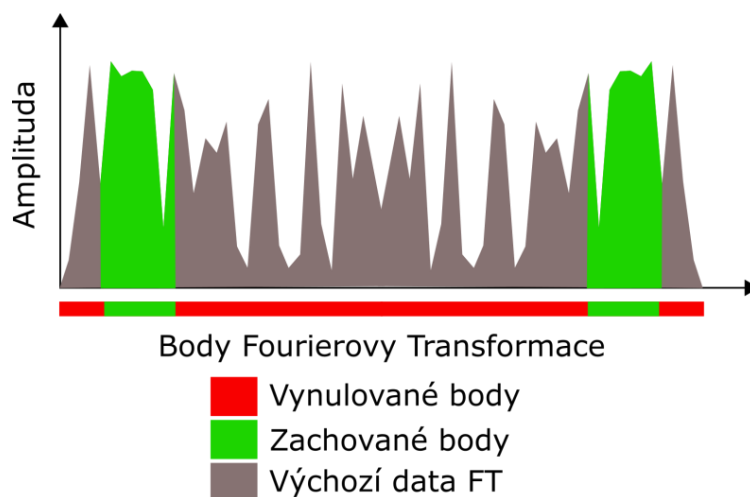
Výstupem této části programu jsou 2D grafy jednotlivých měřených bodů. V tomto případě se bude jednat o křivku RMS hodnot v závislosti na kmitočtu, přičemž průtok je konstantní. Spektrum bylo odstupňováno po intervalu 1 kHz, tedy jeden bod reprezentuje hodnoty 0 - 999 Hz, druhý bod 1 - 1,999 kHz atd. Tyto hodnoty je však měnit, dle potřeby tak můžeme tyto intervaly zvětšit, aby obsáhly větší část spektra, nebo zmenšit abychom viděli přesnější rozložení hodnot. Počet výsledných grafů je tak velmi velký, jelikož bylo použito 6 snímačů, při 11 různých průtocích, 4 kombinacích nastavení klapky a předepnutí a dvou orientacích trubice. Počet vyhodnocovaných grafů tak vyrostl na 528, což je obrovské číslo. Pro zredukování tohoto počtu je nutno udělat jednu z úprav. Navrstvení 2D grafů a vytvoření 3D vrstevnicového, nebo zachováním plošného grafu s nutností redukce zobrazovaných průtoků. Výhody a nevýhody těchto přístupů jsou zmíněny v následujících bodech.

- Vytvořením 3D grafu získáme představu o průběhu amplitud RMS hodnot v závislosti na průtoku a frekvenci, ovšem za cenu přehlednosti. V případě že bychom v jednom grafu chtěli přímo porovnávat dva stavy, konkrétně utažený vs. povolený šroub, je graf značně chaotický. Při použití plošného grafu se budou plochy překrývat a graf bude pro neznalého člověka nepoužitelný.



- Při použití 2D grafů bude vhodné omezit počet průtoků, nicméně budou přímá porovnání mnohem názornější a přehlednější. Vzhledem k povaze tištěné verze této práce bude i přes větší množství grafů tato volba vhodnější.

Tato část programu funguje velice podobně, jako RMS s frekvenčním odsazením s tím rozdílem, že funguje oboustranně. Výpočtem získané hranice analyzované části spektra vytyčí hranice, kde se data FT pro výpočet podle Parsevalova teorému zachovávají a zbývající části jsou vynulovány. Tento princip je opakován podle počtu segmentů, na které je spektrum rozděleno u každého snímače a měřeného bodu. Tento princip ilustruje následující obrázek.



Obrázek 3.25 Ilustrace výběru dat z FT pro jednu část spektra

```

97  %% FFT a RMS z jednotlivých frekvencí
98  for prom=1:6;
99      promenna = dataArray(:, 2+prom); %tzn 3 As,4 pk2,5 pk1,6 a2x,7 a2y,8 a1x
100     FT=fft(promenna);
101     Four(i,:)=FT;
102     for frek=freks;
103         pomer=round(delta/Fs);
104         Bod_start=(frek-1)*1000*pomer;
105         Bod_stop=(frek*1000-1)*pomer;
106         Bod_start2=delta-Bod_stop;
107         Bod_stop2=delta-Bod_start;
108         FTa=FT;
109         FTa(1:Bod_start)=0;
110         FTa(Bod_stop:Bod_start2)=0;
111         FTa(Bod_stop2:end)=0;
112         RMS_f(frek,i,prom) = sqrt(sum(abs(FTa/length(FTa)).^2));
113     end
114 end
115

```

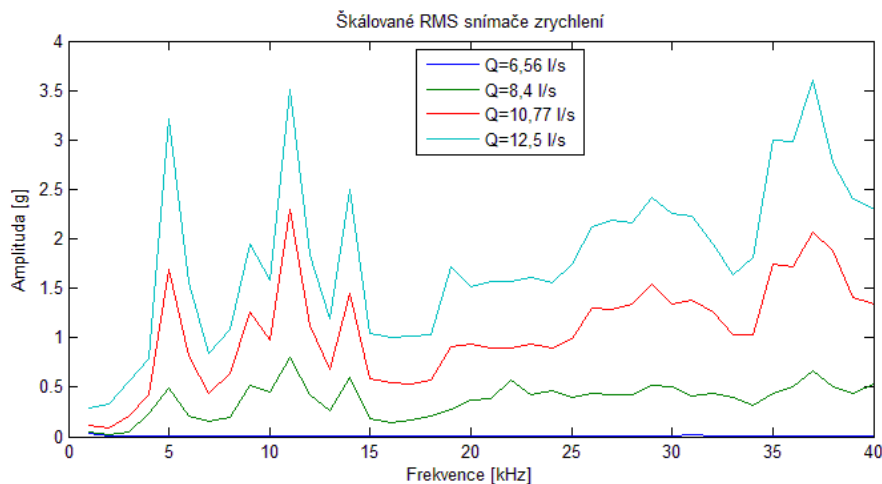
Obrázek 3.26: Detail části programu zabývající dekompozicí dat FT na jednotlivá spektra a následného výpočtu jejich RMS

Z obrázku je patrné rozdělení na dva vnořené *for* cykly. První z nich řeší postupné vyhodnocení všech snímačů v daném bodě a druhý se zabývá právě postupným vyhodnocováním efektivních hodnot z daných částí spektra. V řádce 99 je možno vidět proměnnou nazvanou „promenna“ do které se postupně načtou data různých snímačů, dále se z tohoto záznamu provede Fourierova transformace. Následuje *for* cyklus s rozsahem podle řady „freks“. Tato řada je na počátku programu a určuje rozsah a rozdělení frekvencí,

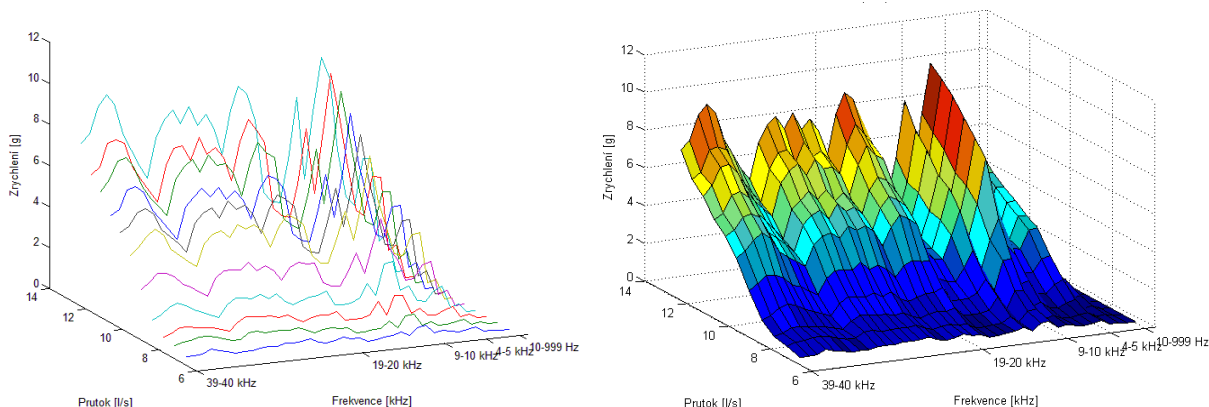




na které se spektrum rozdělí. Podobně jako u odsazení nenulových hodnot se okraje určí konstantou nazvanou „pomer“. Následuje vymezení hraničních bodů pro nulování a jejich přepsání nulovou hodnotou s uložení této pozměněné řady do nové proměnné „FTa“. Z té se potom vypočte hodnota do matice „RMS\_f“. Tuto matici si můžeme představit, jako zetové souřadnice bodů 3D grafu.



Obrázek 3.27: Graf RMS hodnot akcelerometru v závislosti na frekvenci při různých průtocích



Obrázek 3.28: 3D grafy stejných výsledků jako předcházející 2D graf (osa frekvenci naopak) vlevo umístěný čarový graf a vpravo plošný

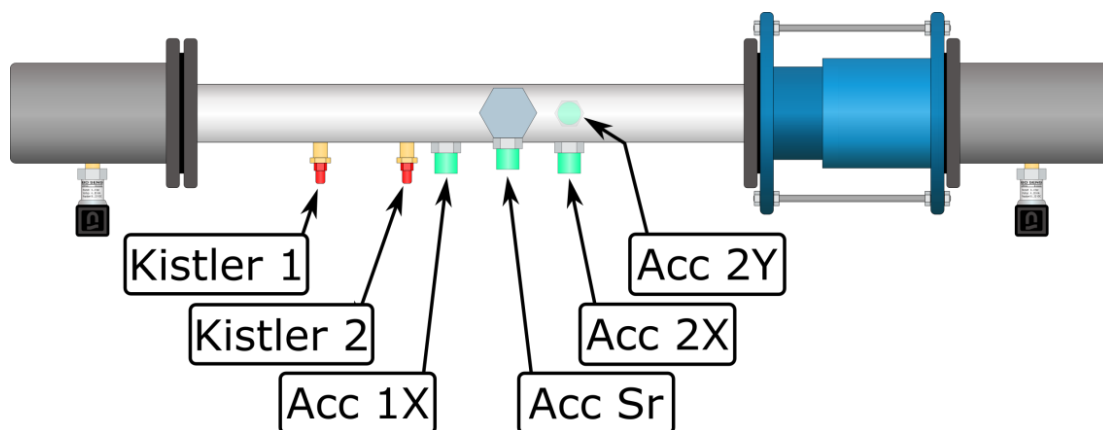


## 4 VÝSLEDKY A JEJICH ZHODNOCENÍ

V této kapitole budou uvedeny výsledné grafy z vyhodnocovacího programu vytvořeného v softwaru MATLAB. Tato kapitola bude rozdělená do podkapitol podle experimentu, z kterého grafy vycházejí. Nejdříve tak budou uvedeny grafy prvního experimentu, ve kterém jde především o porovnávání povoleného a utaženého šroubu spolu s vlivem otevřenosti klapky. V pozdější podkapitole pak budou uvedeny výsledky z experimentu druhého a porovnávají se výsledky měření postupně uvolňovaného šroubu.

### 4.1 VÝSLEDKY PRVNÍHO EXPERIMENTU

V této podkapitole jsou uvedeny výsledky měření z prvního experimentu. Toto měření se zabývalo měřením vlivu předeptnutí šroubu společně s určitou otevřeností klapky na akustický projev. Měření probíhalo ve čtyřech cyklech. Každý cyklus zahrnoval 11 měřených bodů, každý s jiným průtokem. Cykly se od sebe lišily kombinací předeptného, nebo povoleného šroubu a přivřenou, nebo plně otevřenou klapkou. V případě těchto grafů bylo z důvodu přehlednosti vybráno pouze několik hodnot průtoků nejlépe reprezentující průběhy v závislosti na průtoku.



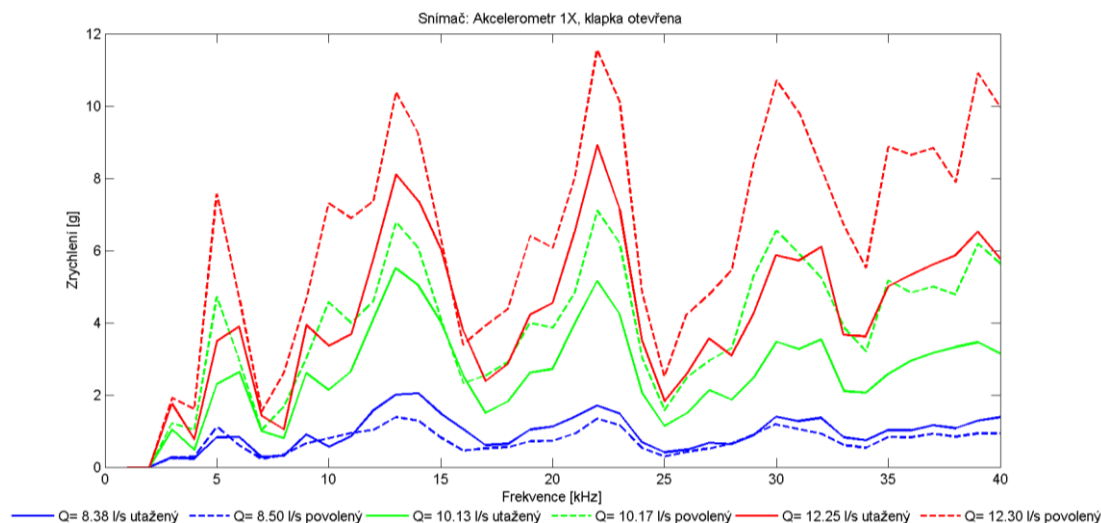
Obrázek 4.1 Schématické znázornění pozic snímačů dle jejich pojmenování v následujících grafech

První důležitou informací, kterou je nutno zmínit je vyřazení snímače akcelerometru na šroubu. Snímač zrychlení používané u experimentu byly jednoosé, měřily tedy pouze zrychlení v ose své souměrnosti. Při povolování, nebo utahování šroubu však docházelo ke změně směru tohoto snímače a tedy k výrazné změně snímaného signálu.

Další úpravou grafů bylo vynulování hodnot grafů v rozsahu od 0 až po frekvenci 2 kHz. Důvodů bylo hned několik. Prvním z nich byly výrazné růsty nízkých frekvencí u piezoelektrických snímačů Kistler, tyto hodnoty byly tak vysoké, že posouvaly měřítko a veškeré hodnoty vyšších frekvencí byly v grafech nerozlišitelné. Druhým důvodem byl podobný problém u akcelerometrů, nicméně příčinou zde byly občasné a u vyšších průtoků už stálé přetížení snímačů. Tato přetížení se projevila nárůstem hodnot v nízkých frekvencích právě v oblasti do 2 kHz. Proto jsou grafy po hranici 2 kHz nulové a následně skokově narůstají na nenulovou hodnotu.

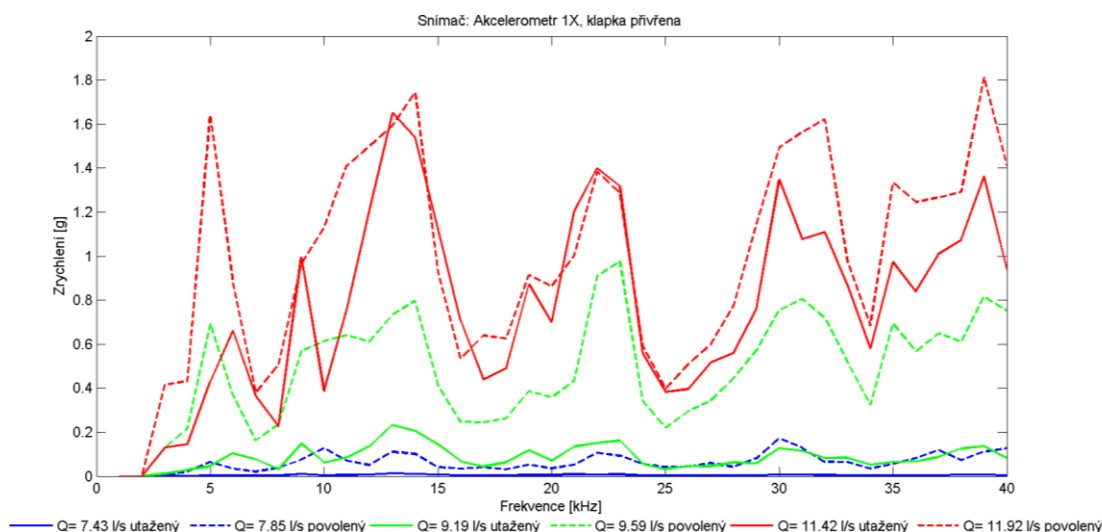


#### 4.1.1 VÝSLEDKY SNÍMAČE 1X



Obrázek 4.2 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 1X, klapka otevřena

Na tomto grafu je viditelné zvýšení efektivních hodnot v celém rozsahu ve prospěch volného šroubu, ale pouze u středního a maximálního průtoku. Hodnoty u nízkého průtoku jsou naopak nižší. Grafy vždy porovnávají body se stejnou otáčkovou frekvencí. V každém s případech je možno vidět, že bod s povoleným šroubem má při stejné otáčkové frekvenci čerpadla mírně vyšší průtok.

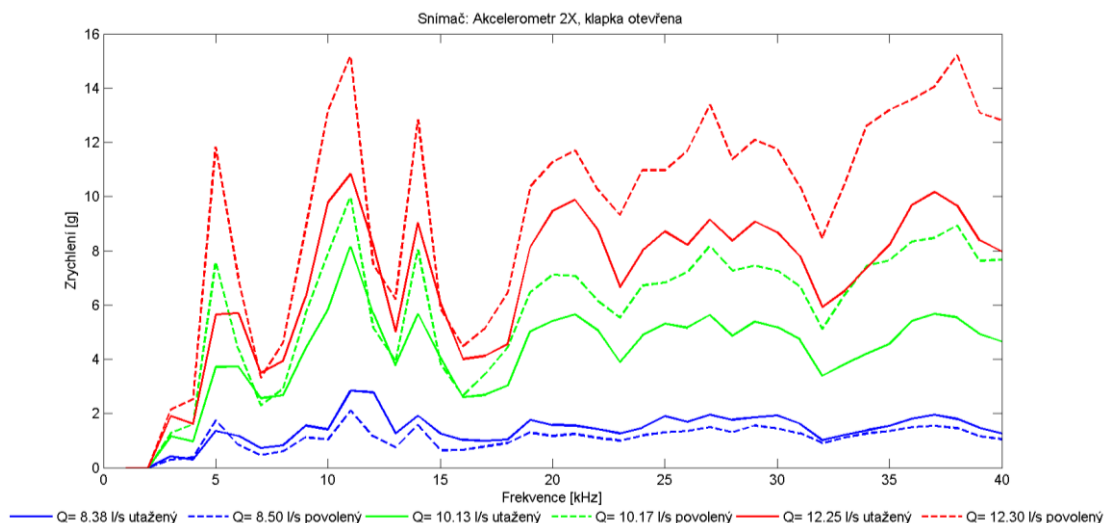


Obrázek 4.3 Efektivní hodnoty zrychlení snímače zrychlení 1X, klapka přivřena

V tomto případě si můžeme všimnout mnohem nižších amplitud, tento výsledek je způsoben přivřením klapky. Díky čemuž došlo k zvýšení tlaku v trubici a tedy k posunutí začátku projevu kavitace do vyšších hodnot průtoku. Hluk a vibrace kavitace ani buzení šroubu nejsou tak výrazné. Rozdíly mezi povoleným a přitaženým šroubem nejsou tak velké, jako v předchozím případě. Jsou zde dokonce frekvenční oblasti, ve kterých se amplituda nezměnila, nebo dokonce klesla. Rozdíly jsou větší u nízkých a středních průtoků, než u průtoků vyšších. Jde tedy o opačný jev než u otevřené klapky. Jsou zde ale frekvence, u kterých je jasně zřetelný nárůst hodnot. Například oblast kolem 5 kHz je zřetelná na obou grafech.

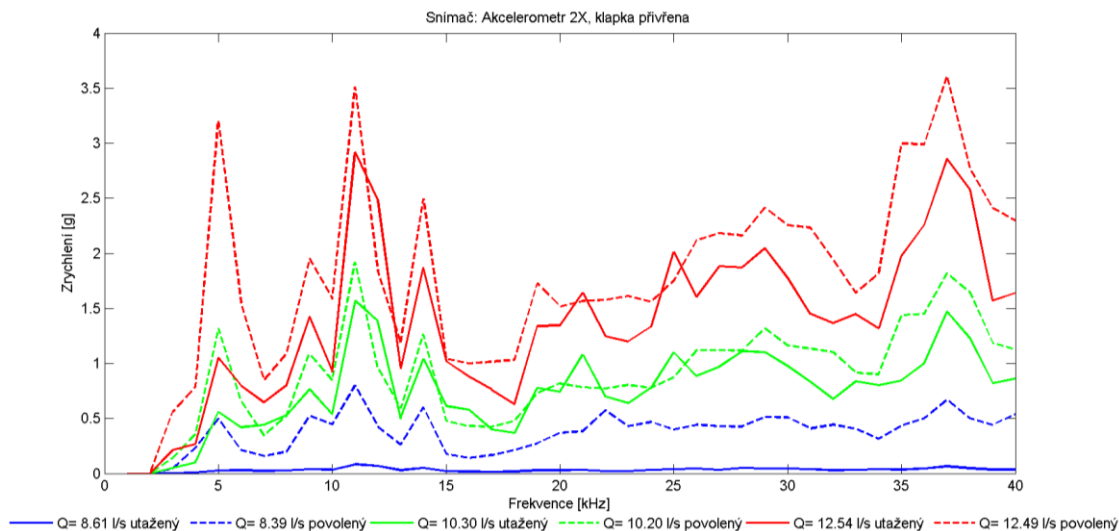


#### 4.1.2 VÝSLEDKY SNÍMAČE 2X



Obrázek 4.4 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 2X, klapka otevřena

Z tohoto grafu jsou zřetelné rozdíly oproti předchozímu grafu. Rozložení spektra je odlišné, oblast v rozmezí 20 až 40 kHz je rovnoměrnější a maximální amplituda je také vyšší. Nicméně společné znaky jsou stále velmi zřetelné. Tyto společné znaky jsou zejména vrchol v 5 kHz, některé vrcholky se přesunuly k nižším frekvencím a vrcholek v cca 37 kHz zůstal stejný. Nízké průtoky jsou opět rozporuplné, nicméně u průtoků vyšších je zřetelný nárůst hodnot v téměř celém rozsahu frekvencí ve prospěch povoleného šroubu.

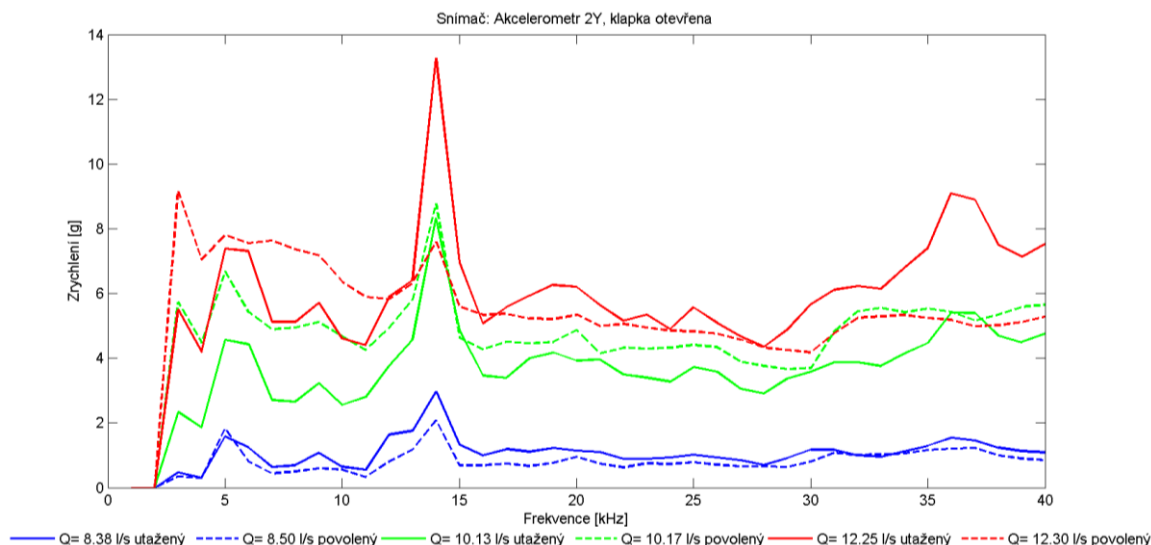


Obrázek 4.5 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 2X, klapka přivřena

Přivřená klapka opět snížila amplitudy v celém rozsahu, nicméně jsou stále vyšší, než u snímače X1. Můžeme tedy vynést alespoň předběžný závěr o vlivu umístění snímačů vzhledem k šroubu. Snímače umístěné za šroubem ve směru proudu média zaznamenávají vibrace s vyšší amplitudou. Tento vliv ještě bude dále zmíněn v samostatné kapitole. Nicméně z tohoto grafu vyplývá, že u přivřené klapky jsou více zřetelné rozdíly mezi předepnutými šrouby v nižších průtocích, než u vyšších průtoků. Ve vyšších průtocích se nicméně zachovávají oblasti, ve kterých můžeme jistě rozeznat utažený šroub od povoleného.

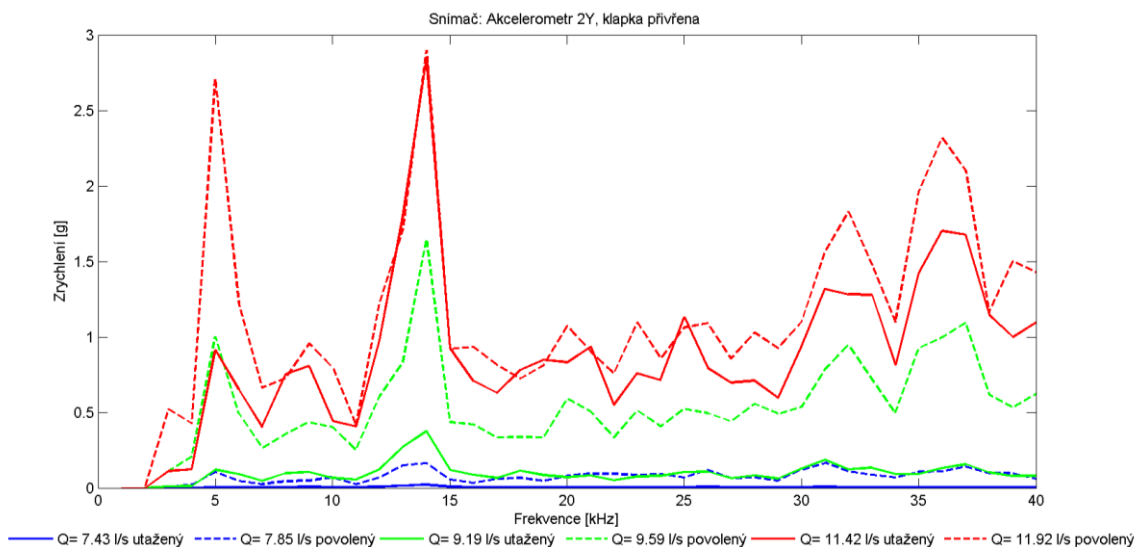


#### 4.1.3 VÝSLEDKY SNÍMAČE 2Y



Obrázek 4.6 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 2Y, klapka otevřena

Vzhledem k umístění tohoto snímače kolmo k ostatním snímačům je změna spektra očekávatelná. Rozlišení mezi oběma stavy utažení šroubu již není v celém spektru tak jednoznačné, jako v případě ostatních snímačů, tím spíše v oblasti nízkých průtoků. Při vyšších průtocích můžeme určitý odstup vidět v oblasti mezi 3 až 11 kHz. Zde je možno s dostatečným odstupem pozorovat zvýšení amplitudy ve prospěch povoleného šroubu.

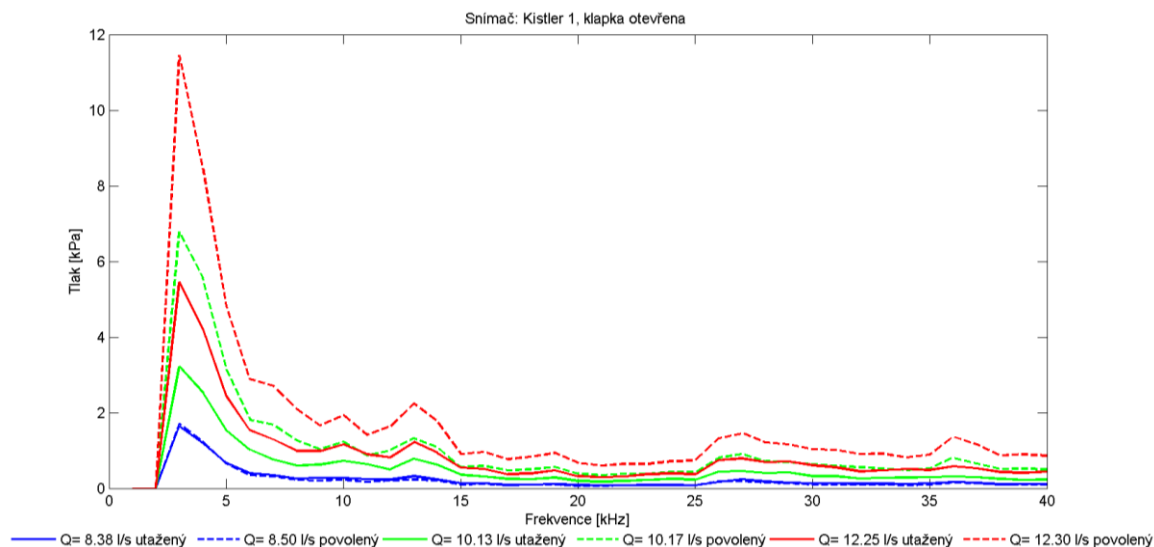


Obrázek 4.7 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 2Y, klapka přivřena

U tohoto snímače se s přivřením klapky odstup mezi utaženími paradoxně lehce zvýšil i u vysokých průtoků. U nízkého průtoku se od sebe oba stavy jasně oddělily, u středního průtoku odstup vzrostl a u maximálního průtoku je většina bodů zvýšena, nicméně stále se hodnoty obou předepnutí protínají. Střední hodnota z celého spektra by však byla výše, než u šroubu utaženého. Vystoupil zde však vrchol v 5 kHz, který se objevuje také na předchozích grafech a v tomto bodě je jasně vidět rozdíl mezi oběma stavy šroubu u všech tří průtoků.

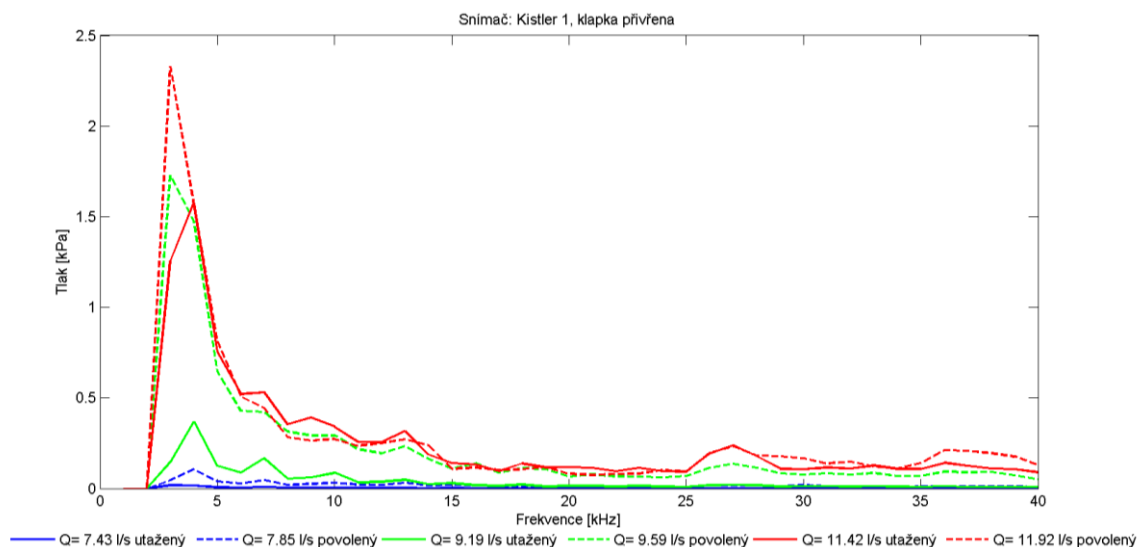


#### 4.1.4 VÝSLEDKY SNÍMAČE KISTLER 1



Obrázek 4.8 Efektivní hodnoty tlaků snímače Kistler 1, klapka otevřena

Snímače Kistler jsou piezoelektrické tlakové snímače vhodné pro měření vysokofrekvenčních talkových pulzací použitelné až do frekvence 100 kHz. Byly, jak ukazuje schéma na začátku kapitoly, umístěny před šroubem a graf jejich efektivních hodnot ve spektru je od akcelerometrů zcela odlišný. Můžeme však jasně vidět vzrůst amplitud ve prospěch povoleného šroubu, nicméně tento nárůst je zřetelný až od určitého průtoku. Průběhy nízkých hodnot se v obou nastaveních šroubu překrývají.

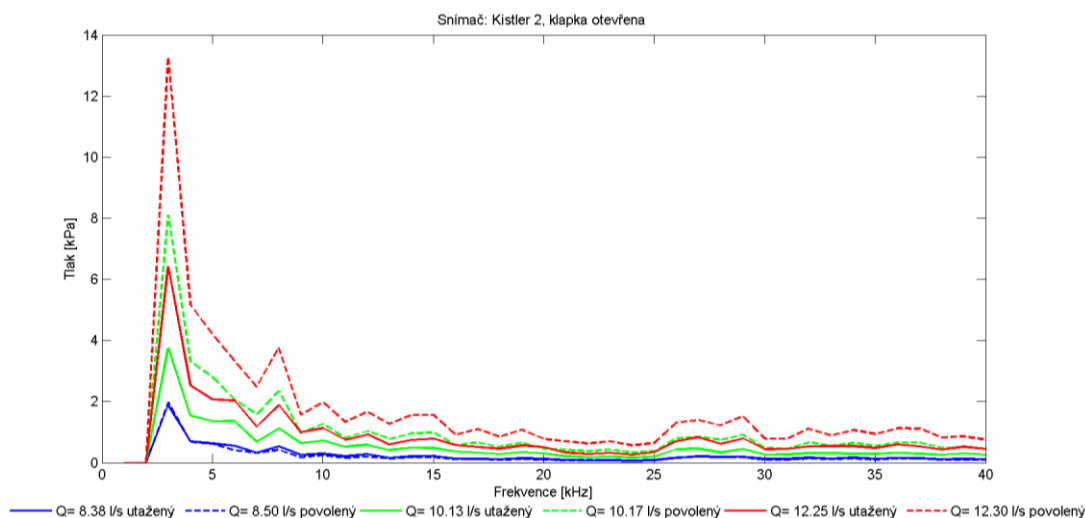


Obrázek 4.9 Efektivní hodnoty tlaků snímače Kistler 1, klapka přivřena

Přivřením klapky se, dle očekávání, amplitudy snížily a podle znalostí z předchozích grafů můžeme vidět oddělení hlavně u nižších průtoků. Vyšší průtok (zelený) je ovlivněn podobně, jeho odsazení oproti utaženému šroubu v celém spektru vzrostlo. Nicméně maximální průtok byl ovlivněn negativně a ve většině spektra se průběhy obou stavů překrývají. Výjimkou je vrchol o frekvenci kolem 4 kHz.

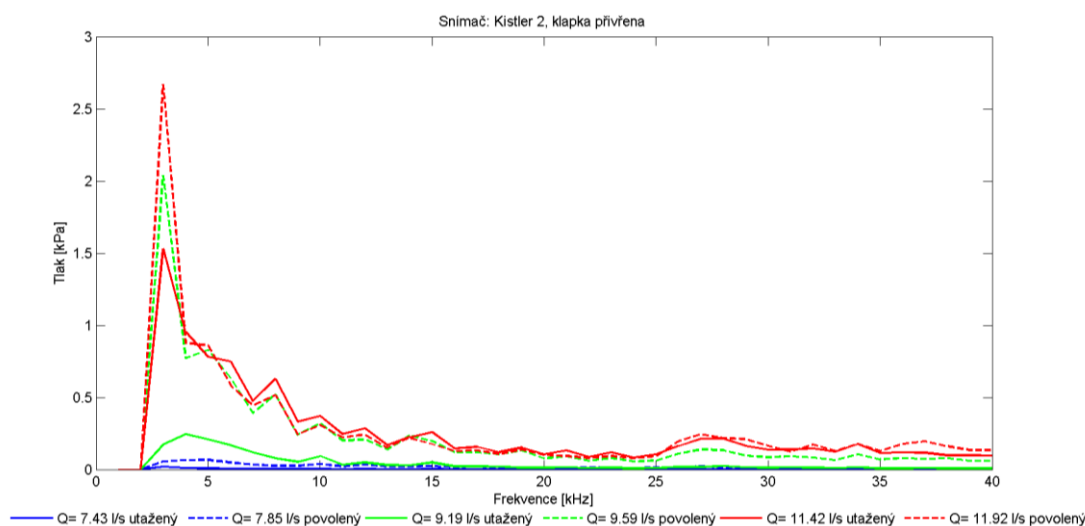


#### 4.1.5 VÝSLEDKY SNÍMAČE KISTLER 2



Obrázek 4.10 Efektivní hodnoty tlaků snímače Kistler 2, klapka otevřena

Snímače zn. Kistler byly při tomto experimentu použity dva, byly umístěny ve vzdálenosti zhruba 10 cm. Toto posunutí evidentně ovlivnilo výsledky záznamu, jelikož v porovnání s předchozím grafem má tento výrazně užší vrcholek v oblasti 3 kHz, navíc přibyl jeden v oblasti 7 kHz a naopak ubyl vrcholek v cca 13 kHz. Přesto můžeme pozorovat velmi podobné výsledky rozlišování, mezi oběma stavy šroubu. Nízké průtoky jsou v podstatě nerozeznatelné, ale s rostoucím průtokem rozlišovací schopnosti rostou v celém spektru.



Obrázek 4.11 Efektivní hodnoty tlaků snímače Kistler 2, klapka přivřena

S přivřenou klapkou je opět zvětšen rozdíl u nízkých a středních hodnot průtoků. Vysoké i nízké průtoky jsou však až na výjimečné oblasti zcela nerozeznatelné.

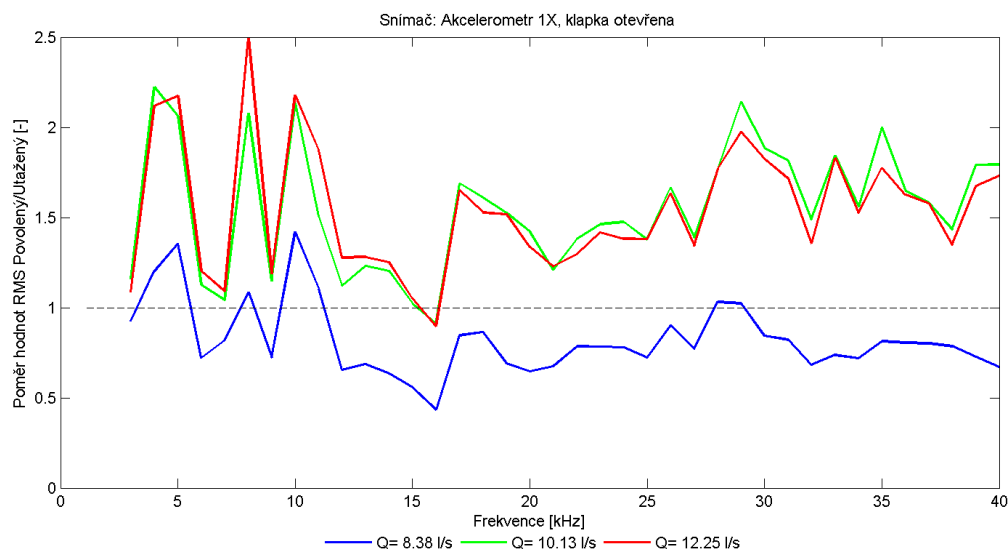




## 4.2 ANALÝZA POMĚRNÝCH ZMĚN HODNOT PRVNÍHO EXPERIMENTU

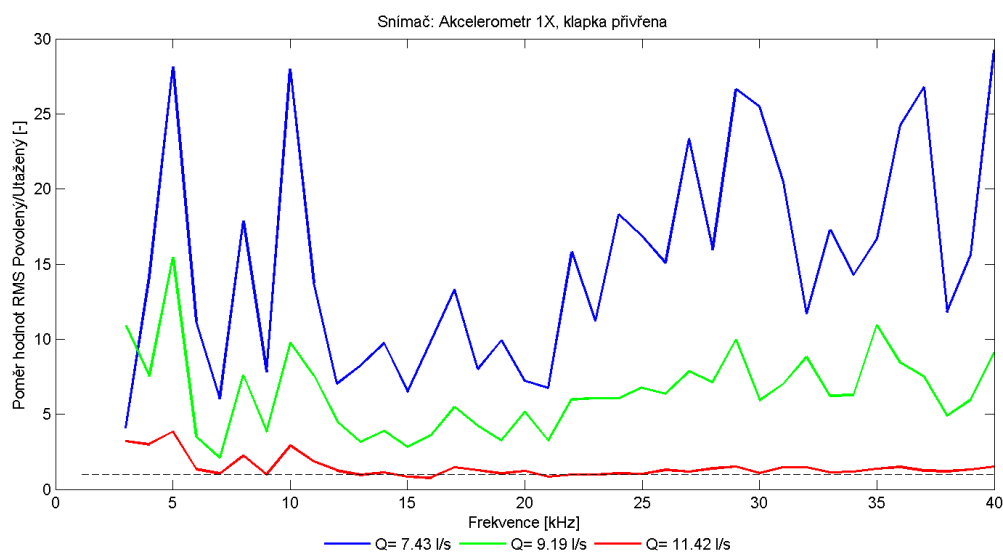
Tato analýza spočívá v zobrazení hodnot povoleného šroubu v poměru k utaženému stavu. Jednotlivé hodnoty spektra jsou vztaženy k prvotnímu stavu utažení. Vzhledem k tomu, že porovnáváme záznamy dvou stavů, je výhodnější a také názornější využití grafu s poměrnými hodnotami. Jsme pak na první pohled schopni zjistit, zda amplitudy záznamu vlivem změny předepnutí vzrostly, či klesly a jak moc oproti původní hodnotě. Motivací využití tohoto zobrazení jsou především málo zřetelné rozdíly amplitud u nízkých průtoků.

### 4.2.1 POMĚRNÉ ZMĚNY - SNÍMAČ 1X



Obrázek 4.12 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 1X, klapka otevřena

Při plně otevřené klapce jsou přírůstky s vyššími průtoky mnohem výraznější, než u průtoků nízkých. Ty jsou v tomto případě dokonce záporné a efektivní hodnoty zrychlení se tak povolením šroubu dokonce snižují. Vlivem rostoucí rychlosti se však hodnoty nezvyšují v celém spektru. V některých oblastech je patrný pokles oproti střední hodnotě rychlosti (oblast 12:40 kHz).



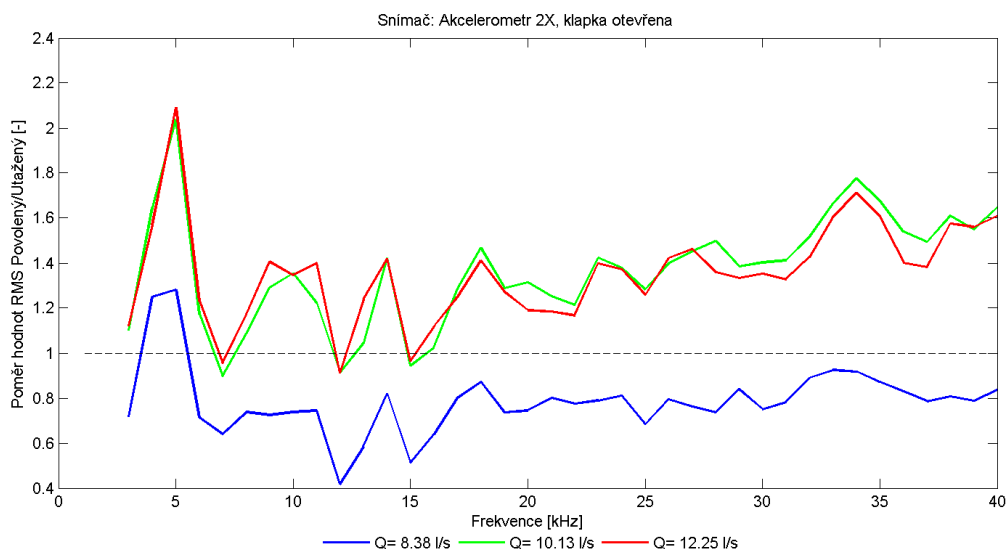
Obrázek 4.13 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 1X, klapka přivřena





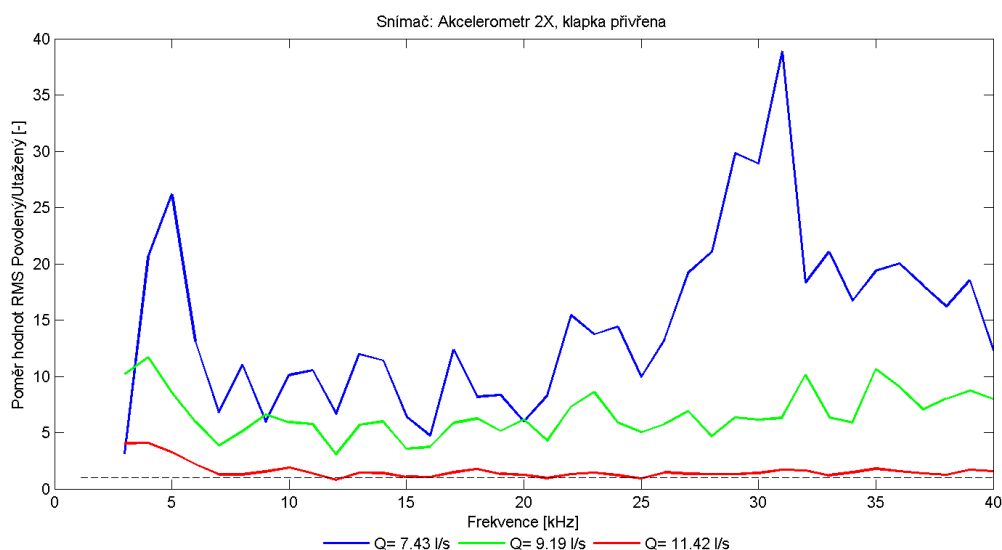
U přivřené klapky je situace jiná, vlivem zvýšení protitlaku se vznik a projev kavitace přesouvá až k vyšším průtokům. Dochází tak k výraznějšímu vlivu kmitání šroubu, než u stejného průtoku s otevřenou klapkou. Můžeme si všimnout velmi výrazného růstu při nízkých hodnotách, které s rostoucím průtokem klesají. To můžeme přisoudit rostoucímu projevu kavitace. Přírůstek zrychlení od kmitajícího šroubu je tak malý v porovnání s kavitací, že poměrný nárůst padá k hodnotě 1.

#### 4.2.2 POMĚRNÉ ZMĚNY - SNÍMAČ 2X



Obrázek 4.14 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 2X, klapka otevřena

Snímač 2X je umístěný na jiném místě a jeho výsledky jsou velice podobné snímači 1X. Velikosti přírůstků jsou řádově stejné, rozdílné je však rozložení spektra. Zatímco u snímače 1X jsou vrcholky u frekvencí 5,7 a 10 kHz, u tohoto snímače je výrazný pouze v oblasti 5 kHz a zbytek spektra je rovnoměrnější. Při nízkém průtoku má povolení šroubu opačný efekt a hodnoty v celém spektru klesají s výjimkou oblasti kolem 5 kHz.

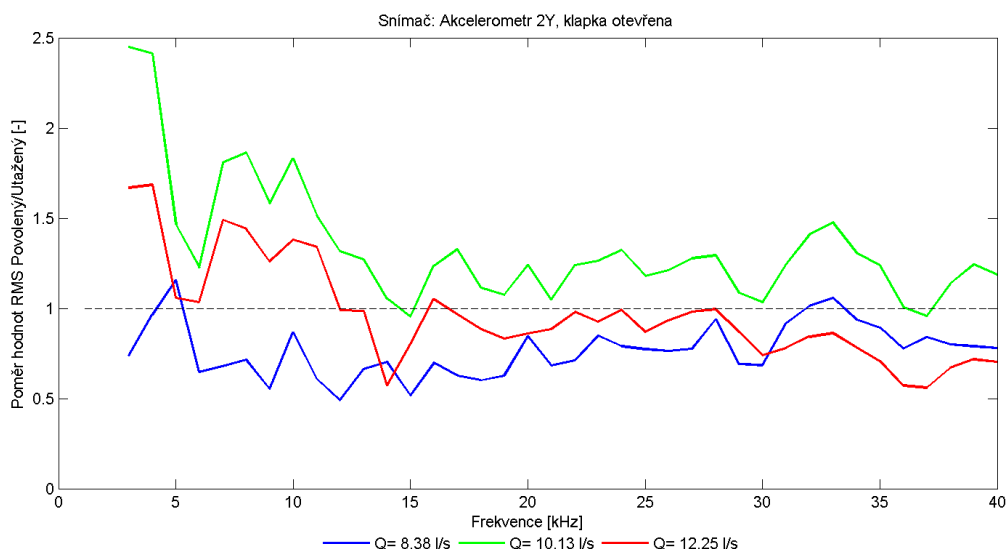


Obrázek 4.15 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 2X, klapka přivřena



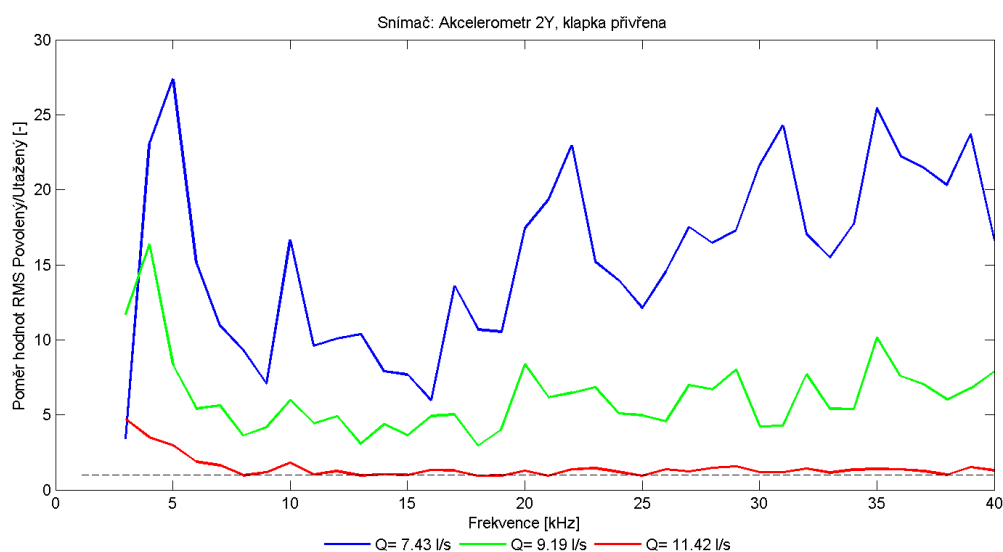
Přivřená klapka opět ovlivňuje růst hodnot při povolení šroubu. Hodnoty celého spektra při malých průtocích rychle rostou a s rostoucím průtokem se tyto rozdíly mezi utaženým a povoleným šroubem zmenšují, nicméně hodnoty stále zůstávají nad jedničkou, tedy rostoucí.

#### 4.2.3 POMĚRNÉ ZMĚNY - SNÍMAČ 2Y



Obrázek 4.16 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 2Y, klapka otevřena

Snímač zrychlení 2Y umístěný za šroubem měřící vertikální zrychlení podává výsledky naprosto odlišné od předchozích snímačů. Do jisté míry je změna předpokladatelná vzhledem k jiné ose. Hodnoty nízkého průtoku jsou klesající, střední průtok je rostoucí, ale s rostoucí frekvencí tento nárůst klesá a hodnoty nárůstu nejvyššího průtoku jsou zhruba do 12 kHz rostoucí a nad tímto bodem kmitání povoleného šroubu vibrace naopak snižuje.

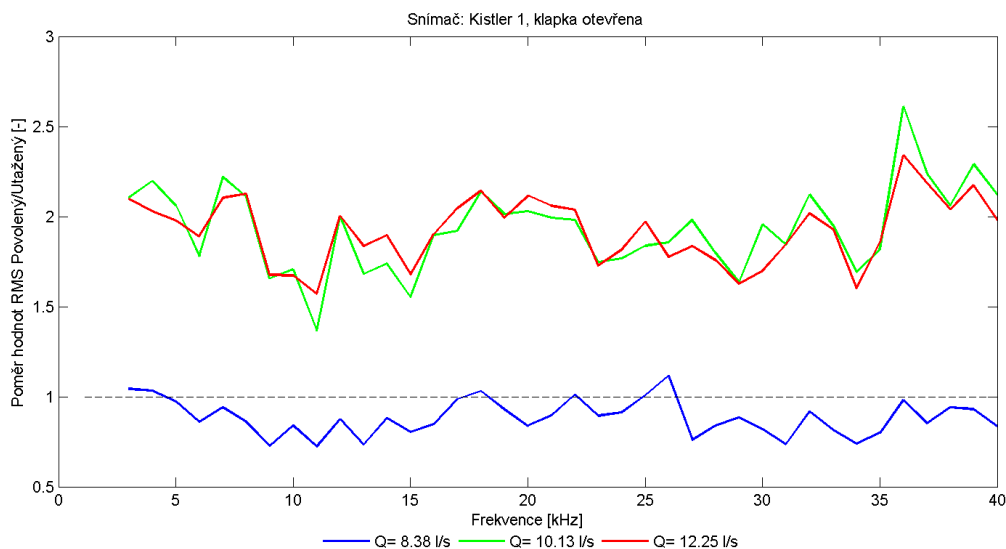


Obrázek 4.17 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 2Y, klapka přivřena



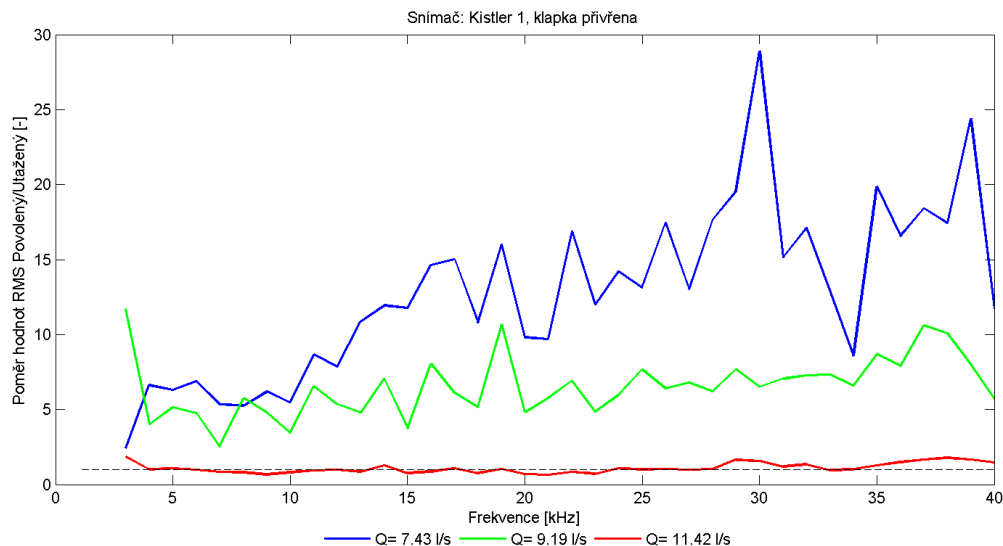
Měření s přivřenou klapkou již dává výsledky podobné ostatním snímačům se stejným nastavením klapky. Snížení předepnutí tedy při nízkém průtoku způsobí vysoký nárůst hodnot a s rostoucím průtokem se tento poměrný nárůst zmenšuje.

#### 4.2.4 POMĚRNÉ ZMĚNY - SNÍMAČ KISTLER 1



Obrázek 4.18 Poměrné změny efektivních hodnot snímače Kistler 1, klapka otevřena

Přestože je o tlakový snímač, jsou průběhy poměrných nárůstů téměř shodné s předchozími snímači. Jediný rozdíl je v rovnoměrném rozložení hodnot v celém spektru. Nízké průtoky opět způsobují poklesy hodnot a střední s vysokým průtokem při povolení šroubu způsobují téměř shodný vzrůst.

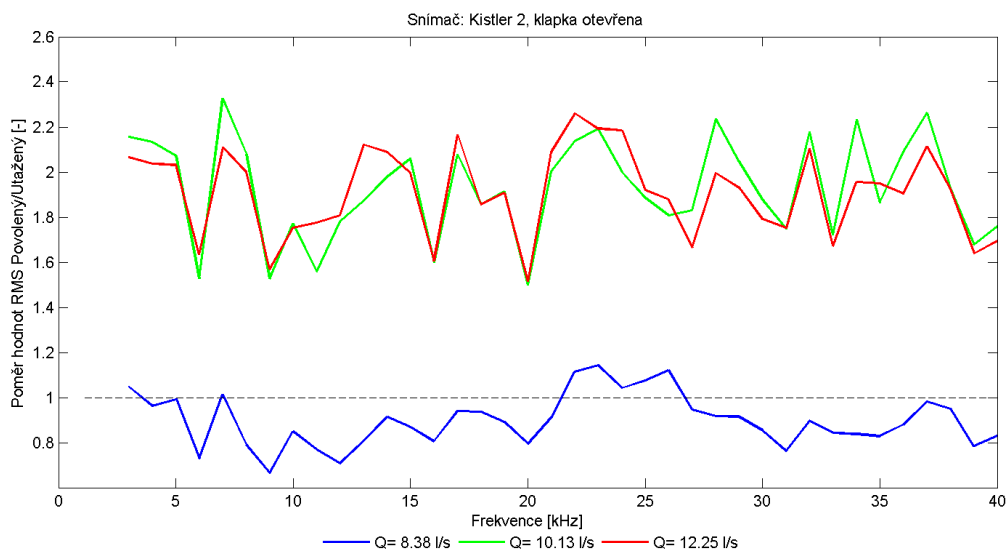


Obrázek 4.19 Poměrné změny efektivních hodnot snímače Kistler 1, klapka přivřena

Přivření klapky se u tlakového snímače projevuje dle očekávání. Nejnížší průtok se při povolení šroubu projeví největším poměrným vzrůstem hodnot. Nicméně zatímco u snímačů zrychlení se vždy v oblasti nízkých frekvencí (kolem 5 kHz) objevil jeden z majoritních vrcholů, zde je situace jiná a přírůstky s frekvencemi rostou. S rostoucím průtokem poměrné změny opět klesají k 1.

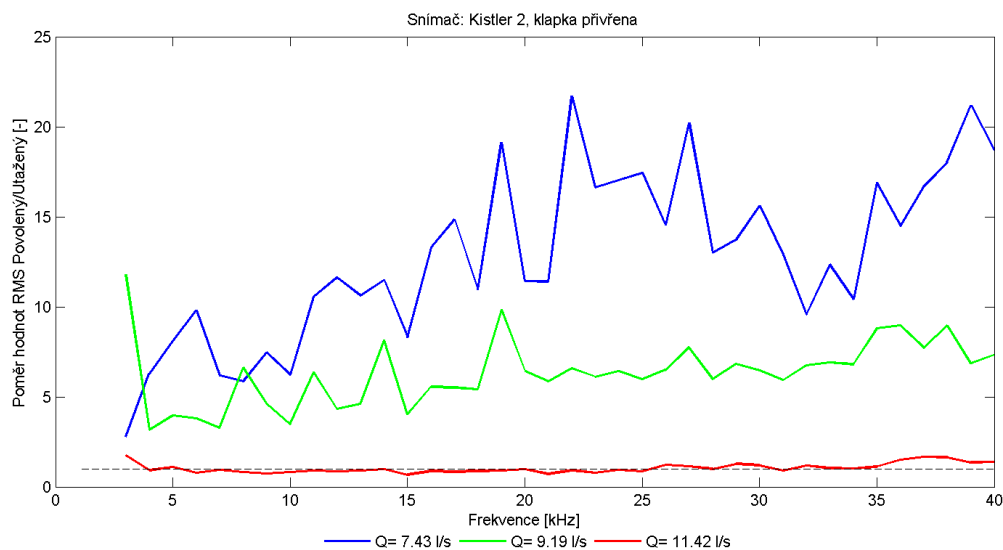


#### 4.2.5 POMĚRNÉ ZMĚNY - SNÍMAČ KISTLER 2



Obrázek 4.20 Poměrné změny efektivních hodnot snímače Kistler 2, klapka otevřena

Tento graf je identický s grafem prvního tlakového snímače Kistler s mírně jiným rozložením spektra. Tento rozdíl je s nejvyšší pravděpodobností způsoben rozdílným umístěním snímače.



Obrázek 4.21 Poměrné změny efektivních hodnot snímače Kistler 2, klapka přivřena

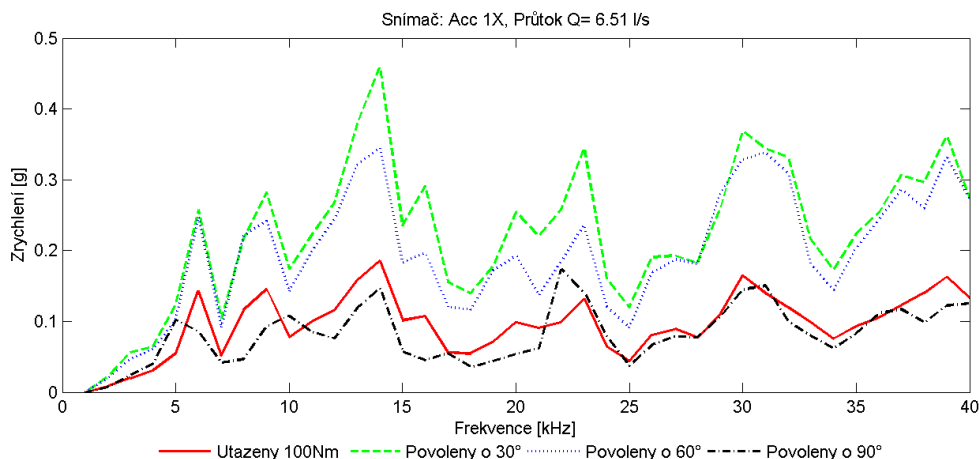
Vliv přivření klapky je naprosto shodný jako u předchozího tlakového snímače. Rozdílů je však více. Maximální hodnota je mnohem nižší a rozložení spektra je také více soustředěno v oblasti 20 – 30 kHz. Zatímco u předchozího snímače jsou hodnoty v této oblasti nižší a je zde vrchol ve frekvenci 30 kHz o amplitudě 30. Tato hodnota je daleko přesahující veškeré hodnoty tohoto snímače.



### 4.3 VÝSLEDKY DRUHÉHO EXPERIMENTU

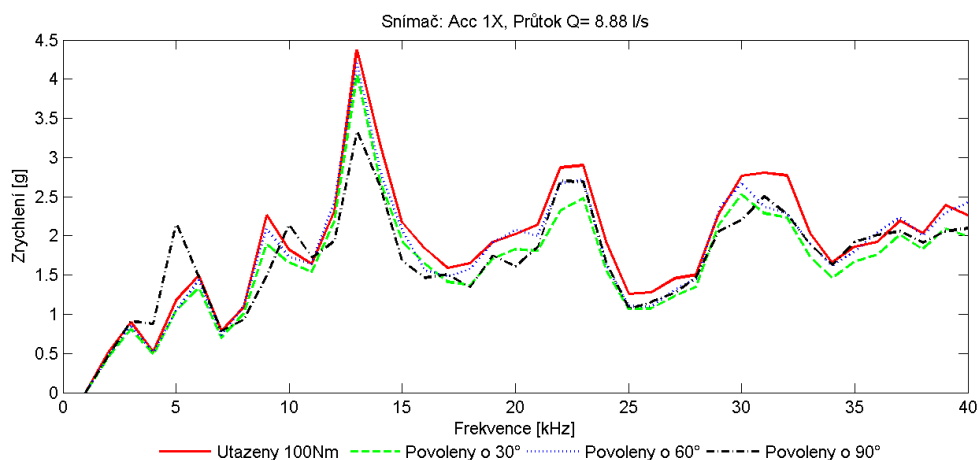
Podstata druhého měření bylo velmi podobná prvnímu experimentu. Opět byl průtok regulován pomocí otáček čerpadla, počet měřených bodů na cyklus byl 11 a frekvence se měnila po 2 Hz od 20 do 40 Hz. Jediným dalším měřeným parametrem bylo předepnutí šroubu. To probíhalo takže, že na začátku byl šroub předepnut na 100 Nm pomocí momentového klíče a s každým dalším cyklem byl šroub povolen pootočením o 30°. Klapka při celém experimentu zůstala plně otevřena.

#### 4.3.1 VÝSLEDKY AKCELEROMETRU 1X



Obrázek 4.22 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 6,51 l/s

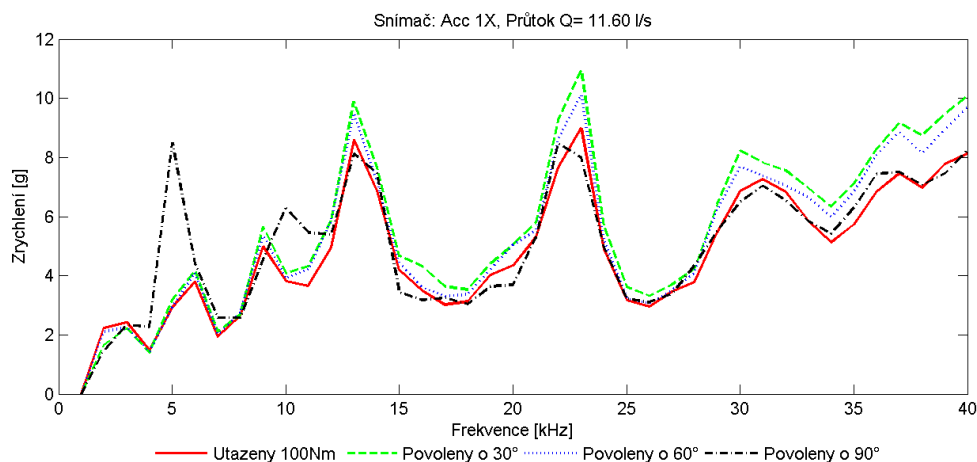
V tomto grafu jsou porovnána spektra efektivních hodnot různých nastavení šroubu při stejném průtoku. Vzhledem k amplitudám grafu je možné, že šroub ještě není dostatečně buzen a může tak jít o vnější rušení. Nejde-li však o rušení jde o velmi rozporuplné výsledky, jelikož nejvyšších hodnot dosahuje záznam po prvním povolení. Naopak zcela nejnižších hodnot dosahuje plně povolený šroub společně s prvotně předepjatým šroubem v celém spektru.



Obrázek 4.23 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 8,88 l/s



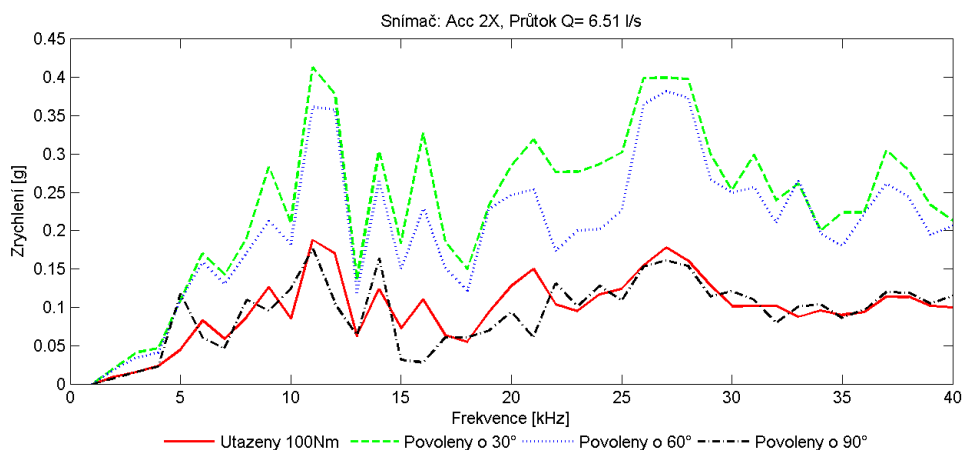
Se zvýšeným průtokem se v celém spektru hodnoty srovnaly. Jediný předpokladatelný výsledek je vytvoření peaku v 5 kHz, kdy plně uvolněný šroub lze rozeznat od ostatních utažení. Zbývající část spektra je při tomto průtoku naprosto nepoužitelná.



Obrázek 4.24 Graf efektivních hodnot při plném průtoku 11,6

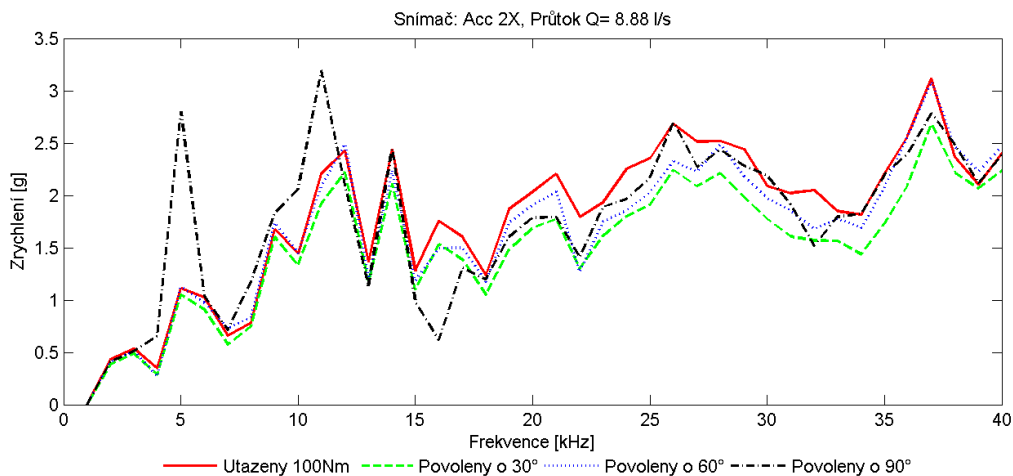
Při průtoku 11,6 l/s dále roste vrcholek v oblasti 5 a 10 kHz. Nicméně v ostatních částech spektra je průběh velmi sporadický a hodnoty se překrývají. Není tak možno sledovat jednoznačný rostoucí trend s povolování šroubu. Naopak v mnohých místech jsou průběhy prohozeny proti očekávání.

### 4.3.2 VÝSLEDKY AKCELEROMETRU 2X



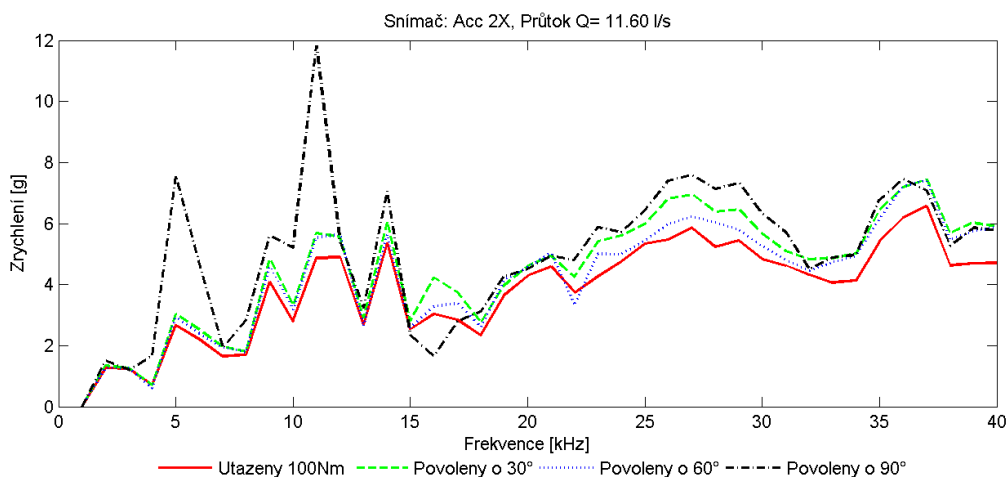
Obrázek 4.25 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 6,51 l/s

Nízké průtoky jsou také u tohoto snímače zdrojem nízkých amplitud průběhů s velmi rozporuplným informačním přínosem. Plně povolený šroub má téměř shodný průběh, jako prvotní plně utažené měření. Opět je zde pravděpodobný vliv rušení a vlivem malých buzení šroubu. Zvláštní pozornost si zaslouží vysoké hodnoty prvních dvou povolení v celém spektru.



Obrázek 4.26 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 8,88 l/s

Při zvýšení průtoku se podobně, jako u předchozích grafů zvýší také amplituda zcela povoleného šroubu především u frekvence 5 a zhruba 11 kHz. Ve zbytku spektra však střídavě klesá a stoupá, nicméně je stále nižší, než hodnoty utaženého šroubu. Zbývající povolení nabývají hodnot blízkých hodnotám šroubu utaženého.

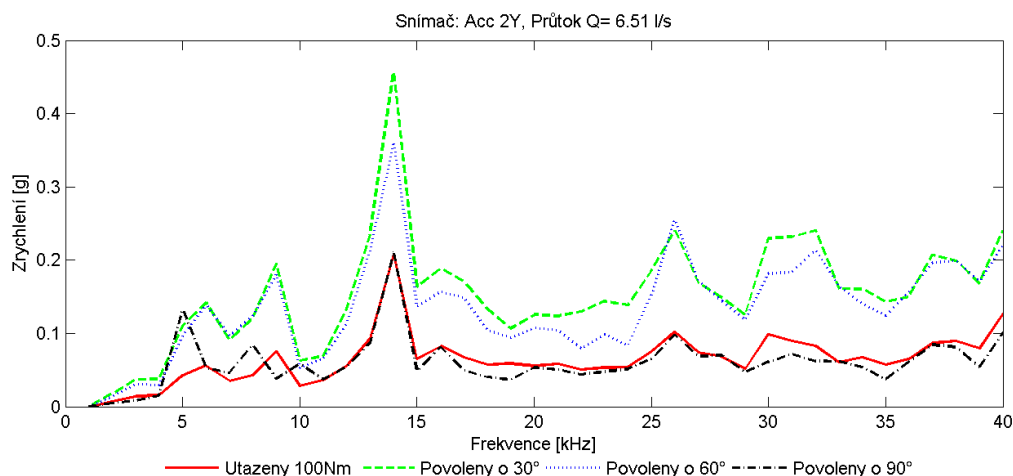


Obrázek 4.27 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 11,6 l/s

Dalším zvýšením průtoku podle očekávání vzrostly hodnoty celého spektra se všemi konfiguracemi utažení šroubu. Jednotlivá povolení jsou již nad hodnotami utaženého šroubu, nicméně první a druhé povolení neodpovídá předpokladu postupného zesilování signálu a jejich hodnoty jsou prohozeny. Hodnoty plně povoleného šroubu mají ve většině spektra nejvyšší hodnoty. Na rozdíl od snímače 1X tak lze rozeznat průběh utaženého a plně povoleného šroubu. Tento rozdíl zřejmě způsobilo umístění snímače před šroub.

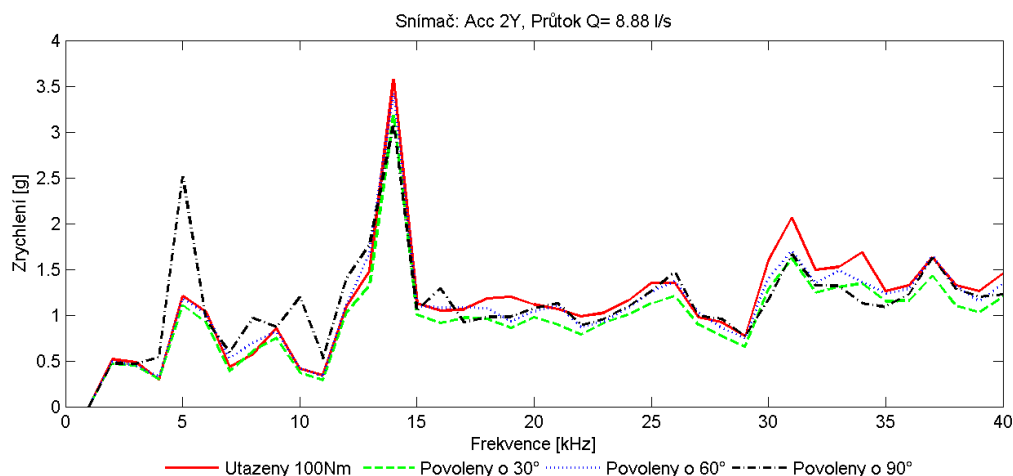


### 4.3.3 VÝSLEDKY AKCELEROMETRU 2Y



Obrázek 4.28 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 6,51 l/s

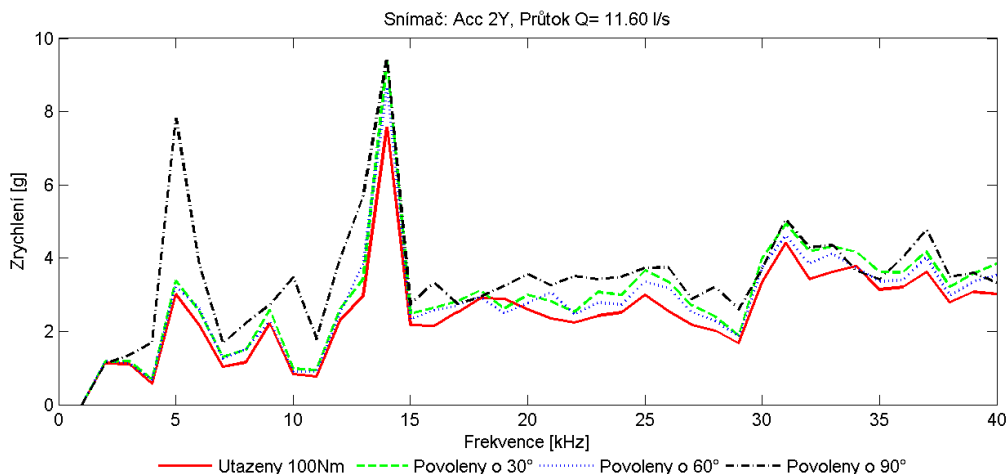
Orientace toho snímače kolmo na předchozí se projevila v poklesu efektivních hodnot v celém spektru a také v jeho rozložení. Markantní je přesun vrcholu z 11 kHz u minulého snímače na 14 kHz. Také přírůstky při prvním a druhém povolení nejsou tak velké, jako u minulého snímače. Nicméně opět se zde projevuje velký růst při prvním povolení a s každým dalším povolením hodnoty klesají až na výchozí hodnoty a v mnoha případech i níže.



Obrázek 4.29 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 8,88 l/s

Zvýšení rychlostí v tomto případě odstup mezi jednotlivými předepnutími spíše eliminuje a rozeznání jednotlivých stavů je tak ztíženo. Jedinou výjimkou je vrchol v 5 kHz, nicméně ten je patrný pouze pro úplné uvolnění šroubu.

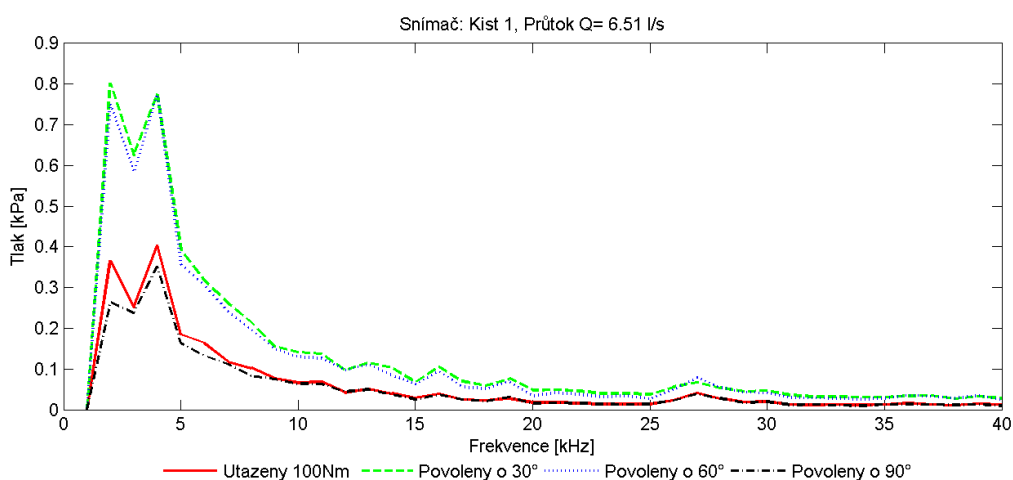




Obrázek 4.30 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 11,6 l/s

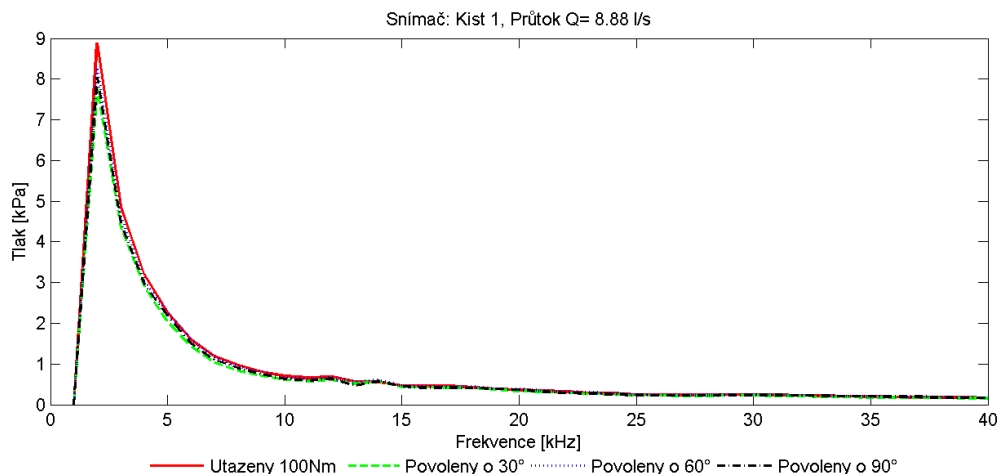
Při maximální rychlosti je zřetelný nárůst hodnot zcela povoleného šroubu v celém spektru, nicméně tento odstup není velký a první dvě povolení jsou prohozena.

#### 4.3.4 VÝSLEDKY TLAKOVÉHO SNÍMAČE KISTLER 1



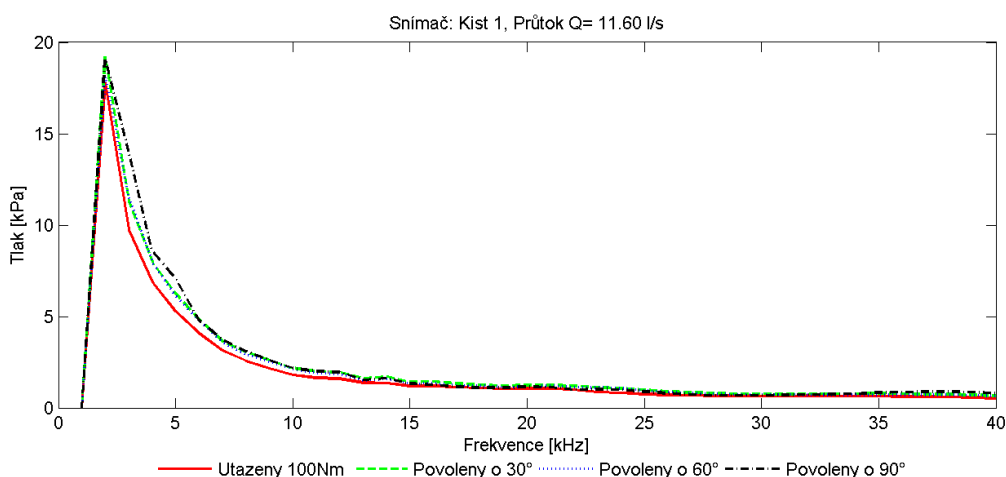
Obrázek 4.31 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 6,51 l/s

Výsledky tlakového snímače Kistler jsou velice sporadická, jelikož jsou hodnoty prvotně utaženého a zcela povoleného šroubu téměř identická a zbývající dvě povolení jsou nad těmito hodnotami ve značném odstupu, ale od sebe jsou naprosto nerozeznatelná. Tento trend je viditelný v celém spektru. Vrcholky pozorovatelné u akcelerometrů jsou pryč a spektrum je, až na prvotní skoky mezi 1 – 5 kHz, velice rovnoměrné.



Obrázek 4.32 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 8,88 l/s

Se vzrůstajícím průtokem dochází k ještě většímu přiblížení všech konfigurací šroubu a z tohoto grafu tak není možno rozeznat ani jeden ze stavů.

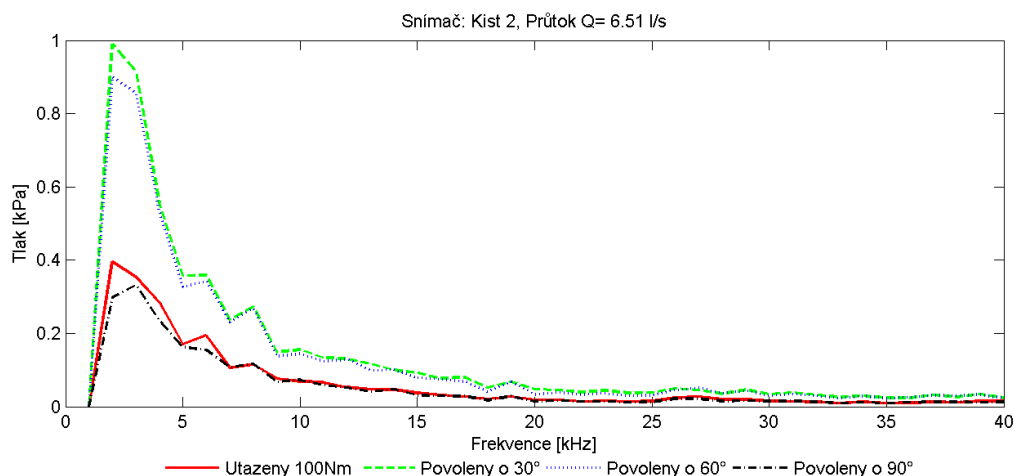


Obrázek 4.33 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 11,6 l/s

Identický případ s předchozím grafem. Jediným rozdílem je malý odstup hodnot povoleného šroubu v celém spektru. Tento odstup je malý, nicméně skýtá určitý potenciál pro rozpoznání stavu utažení.

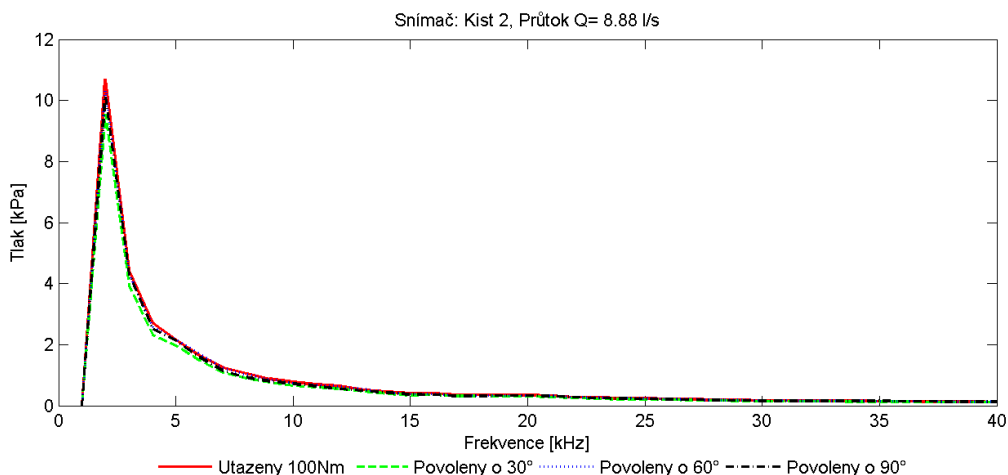


#### 4.3.5 VÝSLEDKY TLAKOVÉHO SNÍMAČE KISTLER 2



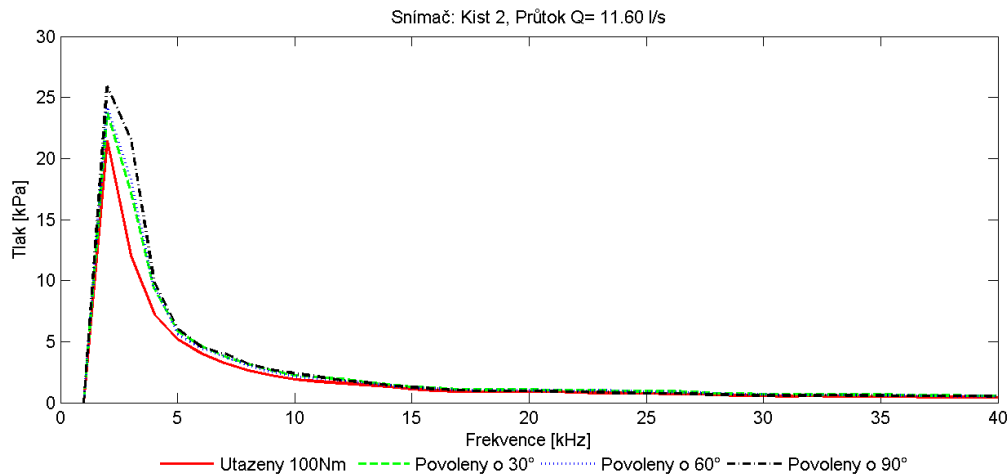
Obrázek 4.34 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 6,51 l/s

Rozdílná pozice tohoto snímače způsobila rozdílné rozložení hodnot ve spektru. V porovnání s obrázkem 4.31 je pásmo vysokých hodnot užší a místo dvou vrcholů je zde jen jeden. Amplitudy maximálních hodnot jsou však vyšší, z hlediska rozlišitelnosti jednotlivých předepnutí však jde o stejný problém jako u předchozích záznamů tohoto průtoku. Plně utažený i povolený šroub dosahuje velmi podobných hodnot. První dvě povolení jsou vzdálena s výrazným odstupem, který s rostoucí frekvencí klesá. Povolení o 30 a 60° jsou rozdílná pouze v určitých frekvencích a jejich amplitudy jsou nelogicky vyšší v případě prvního povolení.



Obrázek 4.35 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 8,88 l/s

Při rostoucím průtoku je možno pozorovat shodný trend s prvním snímačem Kistler, hodnoty všech utažení šroubu jsou téměř shodná v celém spektru. Je zde pouze jeden hlavní vrchol, nicméně jeho přesnou polohu neznáme vzhledem k odsazení veškerých hodnot v rozmezí 0 – 1 kHz. Na rozdíl od snímačů zrychlení však došlo k opětovnému vyhlazení křivky a kromě hlavního vrcholu nejsou viditelné žádné minoritní vrcholky.



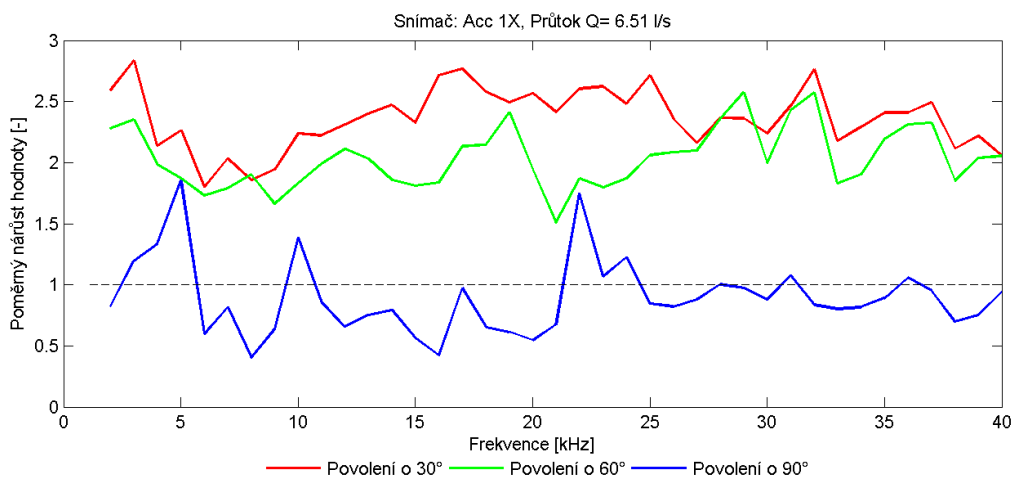
Obrázek 4.36 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 11,6 l/s

Při maximálním průtoku se od sebe hodnoty tlakových pulzací jednotlivých utažení oddělila a to ve správném pořadí. V tomto místě zřejmě nedochází k žádnému rušení snímače a hodnoty měření nejsou negativně ovlivněny. V každém případě je tento záznam vzhledem k rozeznatelnosti jednotlivých stavů utažení nejvhodnější pro posuzování výskytu trhliny. Přírůstky nejsou velké, ale jsou v širokém pásmu cca 3 – 15 kHz.



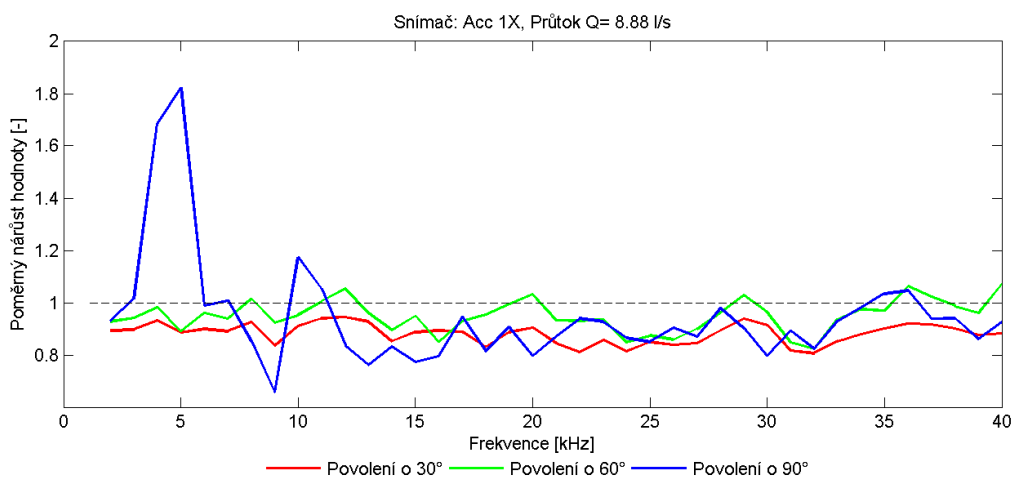
## 4.4 ANALÝZA POMĚRNÉHO NÁRŮSTU HODNOT DRUHÉHO EXPERIMENTU

### 4.4.1 POMĚRNÉ ZMĚNY - SNÍMAČ 1X



Obrázek 4.37 Poměrné změny snímače 1X při průtoku 6,51 l/s

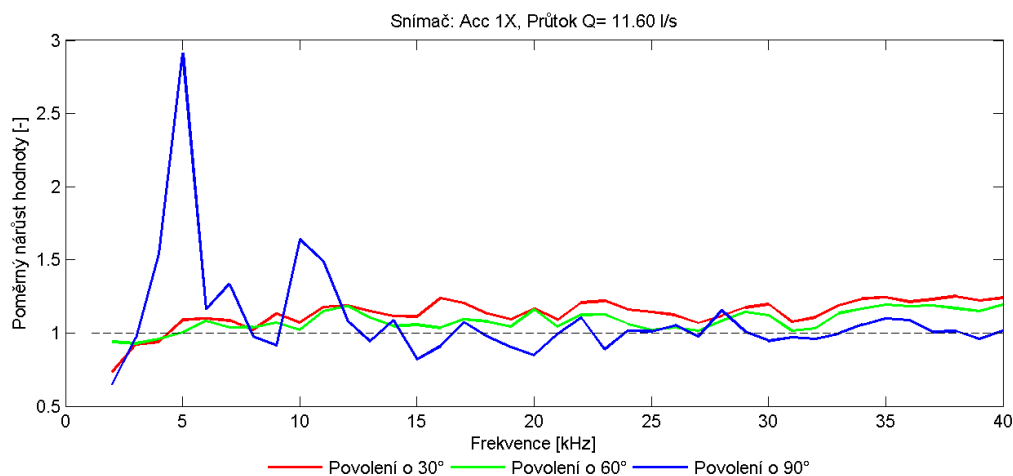
V případě těchto grafů je nutno si uvědomit, že na rozdíl od předchozích grafů nárůstů se nemění průtoky, ale předepnutí. Průtok je pro jeden graf vždy stejný a tyto vzrůsty vyjadřují poměrný přírůstek při povolení o daný úhel vůči prvotnímu předepnutí. Přestože jsou tedy grafy vzhledově velice podobné, vyjadřují zcela jinou závislost. Z grafu je zřetelné, že při povolení o první úhel je přírůstek efektivní hodnoty maximální a s každým dalším povolením tento přírůstek klesá. V případě úplného uvolnění šroubu se pohybují hodnoty poměrného přírůstku dokonce i v záporných hodnotách. Tento průběh vzhledem k nízkým průtokům není dle očekávání. Je však možné, že při prvním povolení dochází ke kmitání šroubu a k přenosu těchto kmitů do trubice. S klesajícím předepnutím pak dochází k větší volnosti kmitání šroubu, ale v opozici stojí možnost toto kmitání přenášet do trubice, která s klesajícím předepnutím klesá. V určité úrovni předepnutí je tak možné dosáhnouti maximálního účinku buzení a přenosu, která zřejmě odpovídá povolení o 30° a s každým dalším povolením tyto účinky klesají.



Obrázek 4.38 Poměrné změny snímače 1X při průtoku 8,88 l/s



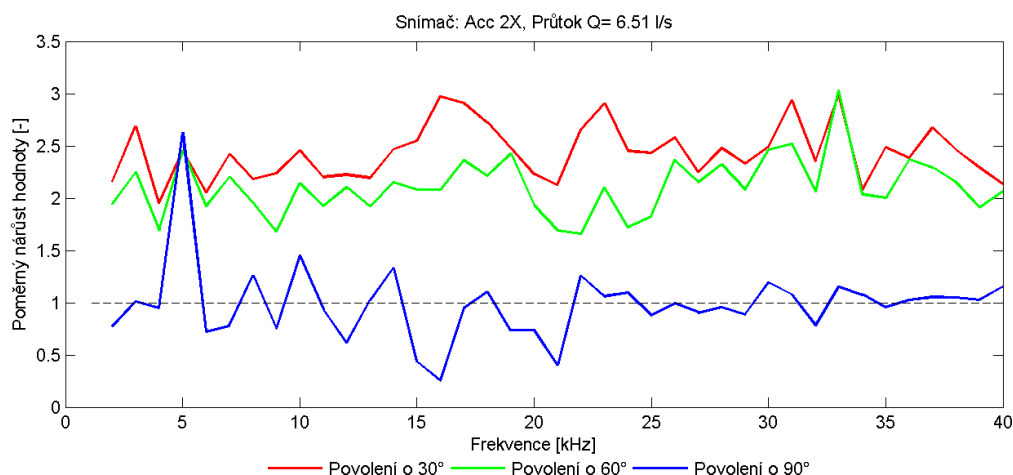
Při zvýšení průtoku jsou průběhy poměrných nárůstů zcela jiné, ve většině spektra povolení způsobují pokles hodnot. Výjimkou jsou občasné pásma frekvencí, u kterých dochází k malému vzrůstu a také výrazná oblast 5 a 10 kHz u plně povoleného šroubu.



Obrázek 4.39 Poměrné změny snímače 1X při průtoku 11,61 l/s

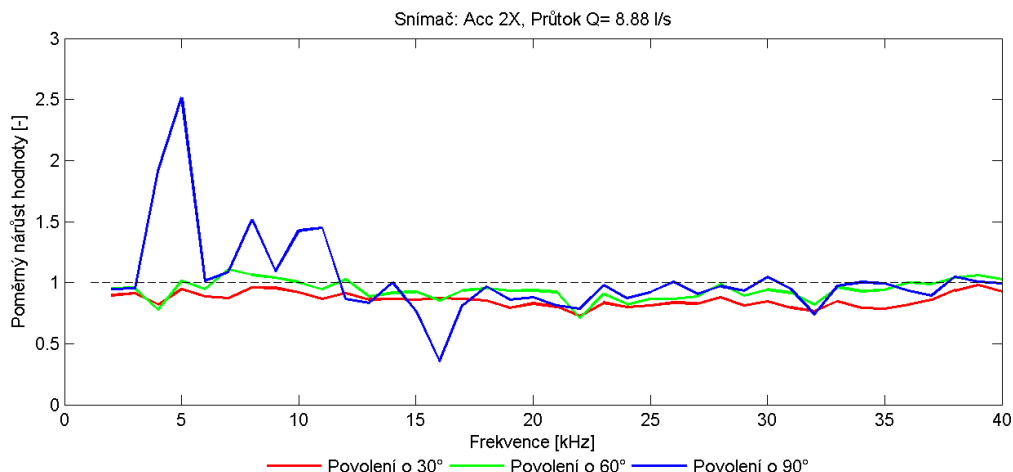
Dalším zvýšením průtoku způsobí opětovný růst hodnot prvních dvou povolení u frekvencí vyšších, než 5 kHz. Hodnoty u plně povoleného šroubu však zůstávají oscilovat kolem poměrné hodnoty 1. Jedinými výrazně rostoucími pásmy jsou 5 a 10 kHz stejně jako u minulého grafu.

#### 4.4.2 POMĚRNÉ ZMĚNY - SNÍMAČ 2X



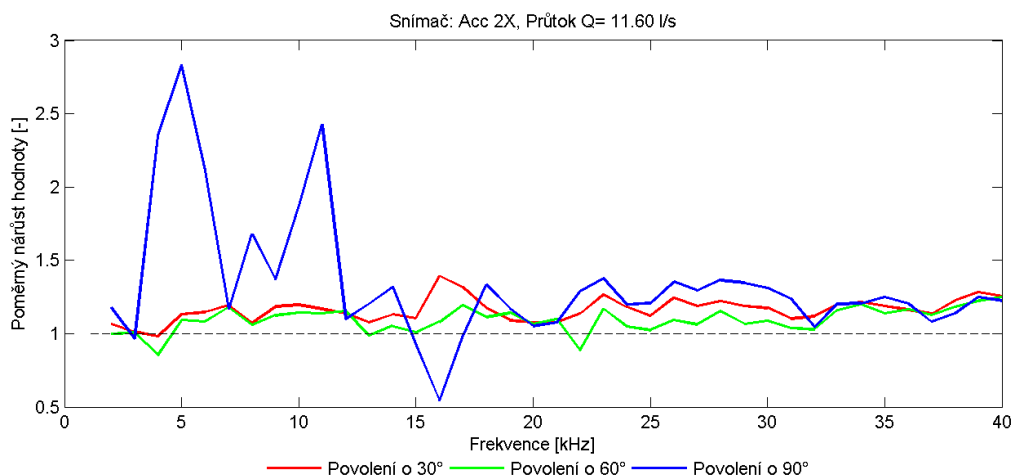
Obrázek 4.40 Poměrné změny snímače 2X při průtoku 6,51 l/s

Výsledky velice podobné snímači 1X při stejném průtoku. Obě první povolení jsou rostoucí s poměrnými hodnotami vzrůstu kolem 2,5, přičemž první povolení má vliv vyššího vzrůstu, než druhé. Úplně uvolnění je pak velice blízko původnímu předepnutí s hodnotami střídavě rostoucími a klesajícími. Opět je zde výrazný růst při frekvenci 5 kHz.



Obrázek 4.41 Poměrné změny snímače 2X při průtoku 8,88 l/s

Při průtoku 8,88 l/s jsou výsledky poměrných vzrůstů velice kontroverzní. První dvě povolení jsou klesající. Druhé povolení je blíže původnímu předepnutí a úplně uvolnění má několik vrcholů v oblasti 5 – 12 kHz, za tímto rozmezím je klesající.

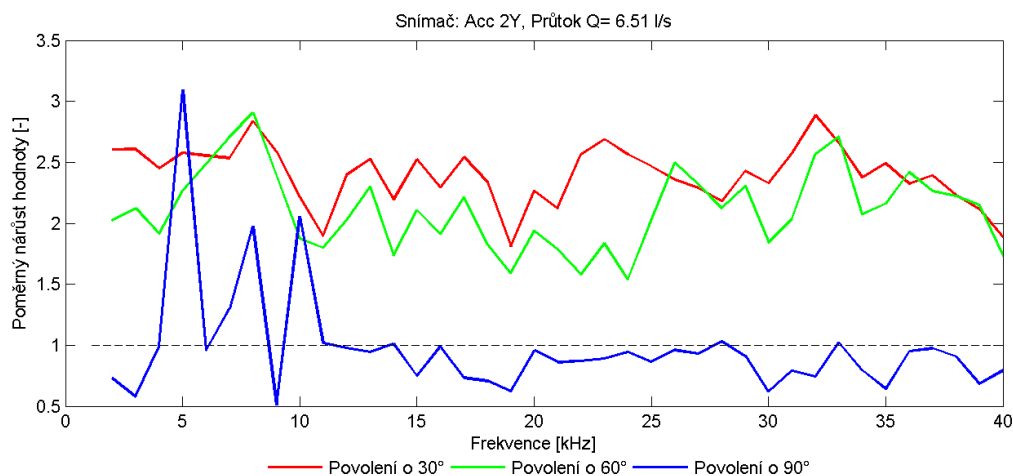


Obrázek 4.42 Poměrné změny snímače 2X při průtoku 11,6 l/s

Maximální průtok výsledky způsobil vzrůsty hodnot až na malé výjimky v celém spektru. Opět jsou zde zřetelné výrazné přírůstky u frekvencí 5 a 11 kHz. U tohoto senzoru jsou při stejném průtoku hodnoty plně povoleného šroubu vyšší, než u snímače 1X. Tyto hodnoty jsou také vyšší, než první dvě povolení.

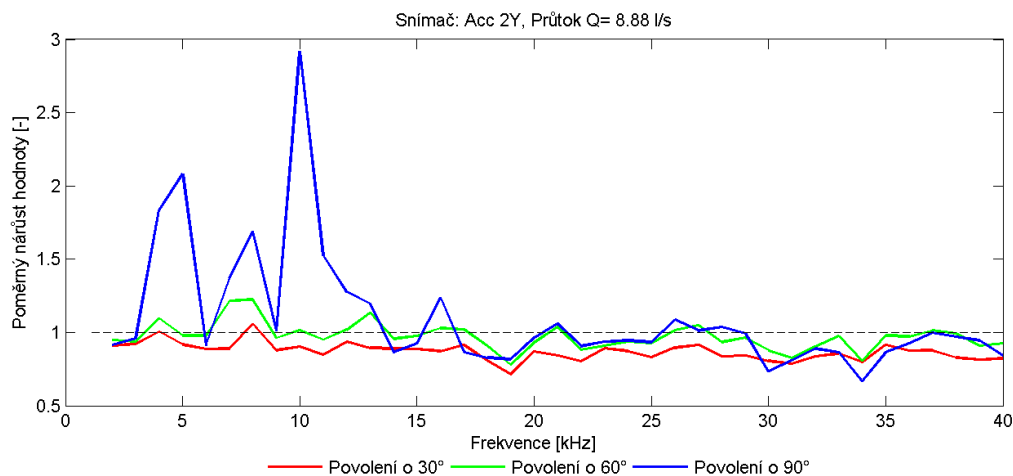


#### 4.4.3 POMĚRNÉ ZMĚNY – SNÍMAČ 2Y



Obrázek 4.43 Poměrné změny snímače 2Y při průtoku 6,51 l/s

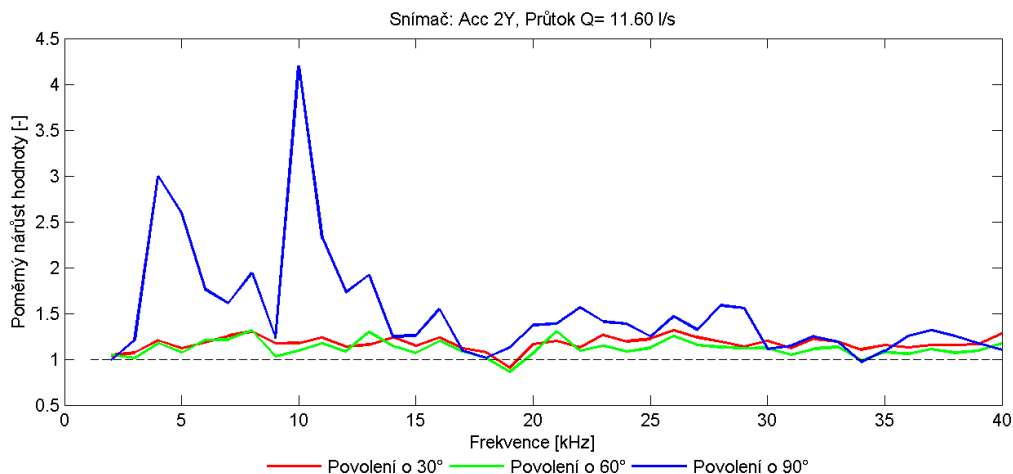
Tento snímač zrychlení je umístěn kolmo na předchozí, a proto je předpokládána změna amplitud v spektru. Trend je však stejný, jako u přechozích výsledků. První povolení způsobuje nejvyšší vzrůst hodnot zrychlení, další povolení už však způsobí pokles a toto klesání pokračuje až do úplného povolení šroubu. Oproti předešlým grafům je zde mnohem výraznější vrchol frekvence 10 kHz.



Obrázek 4.44 Poměrné změny snímače 2Y při průtoku 8,88 l/s

U středního průtoku podobně, jako u předchozích dochází k poklesu poměrných hodnot prvního a druhého povolení v celém spektru, nicméně hodnota amplitudy zcela povoleného šroubu o frekvenci 10 kHz vzrostla. Ve zbytku hodnot povoleného šroubu došlo k přiblížení k hodnotě 1.

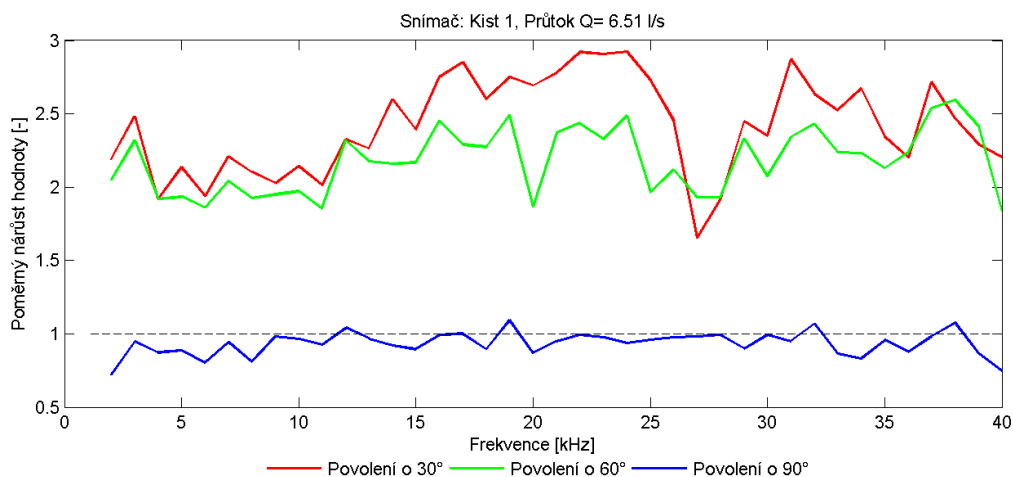




Obrázek 4.45 Poměrné změny snímače 2Y při průtoku 11,6 l/s

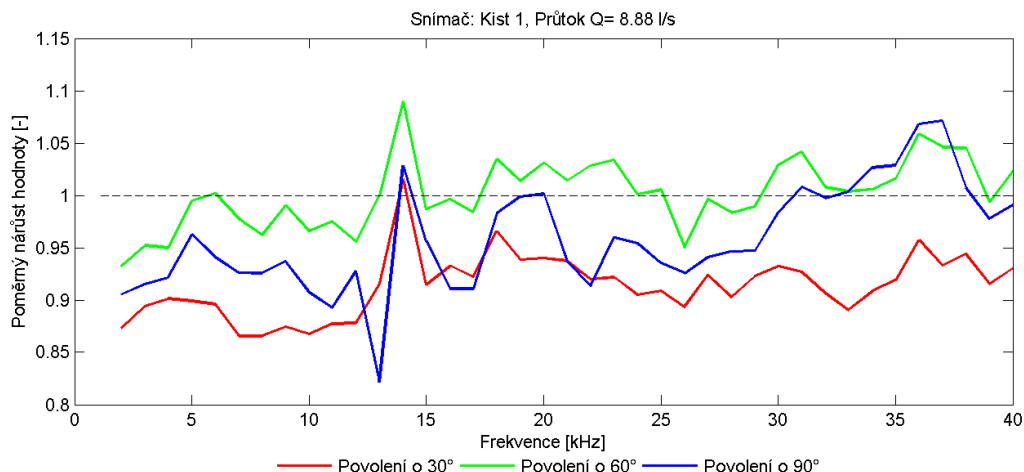
Při maximálním průtoku mají až na výjimky veškeré povolení vliv vzrůstu efektivních hodnot. První dvě povolení však mají téměř shodné průběhy a pro přesné posouzení o stavu utažení by je nebylo možné použít. Úplné povolení způsobuje při tomto průtoku nejvyšší vzrůst a vrcholky o frekvencích 5 a 10 kHz dále vzrostly.

#### 4.4.4 POMĚRNÉ ZMĚNY - SNÍMAČ KISTLER 1



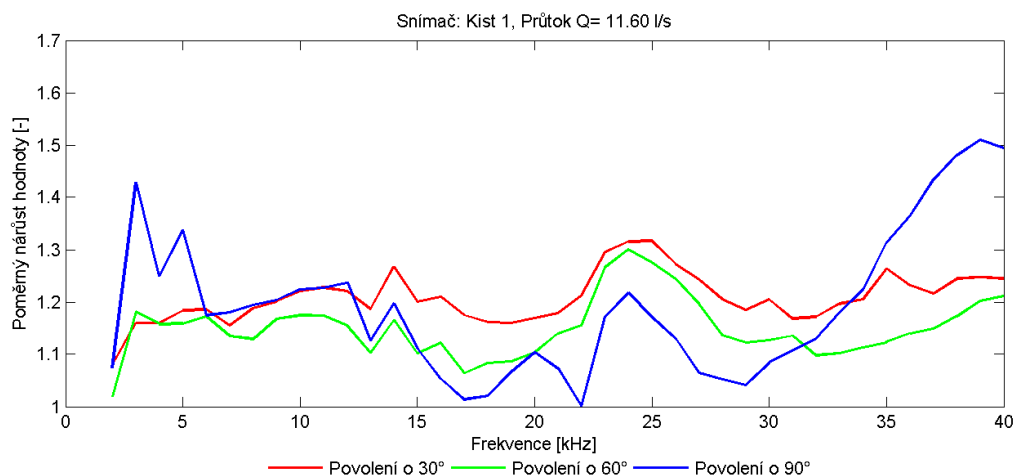
Obrázek 4.46 Poměrné změny snímače Kistler 1 při průtoku 6,51 l/s

Tlakové snímače se charakterově odlišují od snímačů zrychlení, rozložení spektra je mnohem vyrovnanější a nejsou zde patrné typické vrcholky v oblasti 5 a 10 kHz. Amplitudy tohoto grafu jsou v souladu s předchozími grafy stejného průtoku. Povolení šroubu o 30° tedy způsobí nejvyšší vzrůst hodnot, další povolení pak již způsobují pokles amplitud až do úplného uvolnění, kdy jsou hodnoty téměř shodné s prvotním předepnutým stavem.



Obrázek 4.47 Poměrné změny snímače Kistler 1 při průtoku 8,88 l/s

Při středním průtoku jsou hodnoty poměrných nárůstů zcela odlišné od snímačů zrychlení. Povolení o 30° při tomto průtoku způsobí pokles efektivních hodnot, ale další povolení se projeví růstem zhruba na původní hodnoty utaženého šroubu. Úplné povolení však v tomto případě nevyvolá další vzrůst, ale naopak ve většině spektra vyvolá propad hodnot s výjimkou malé oblasti mezi 33 a 37 kHz.

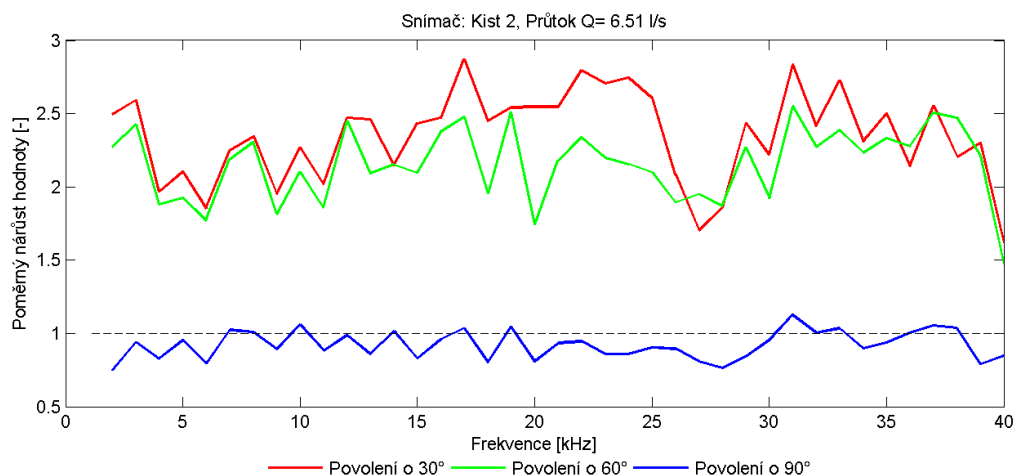


Obrázek 4.48 Poměrné změny snímače Kistler 1 při průtoku 11,6 l/s

Při zvýšení průtoku na maximální hodnotu dochází opět k promíchání průběhů poměrných přírůstků jednotlivých povolení. Všechna z povolení při tomto průtoku se projevují vzrůstem hodnot. První dvě povolení mají velice podobný průběh s malým odsazením ve prospěch prvního povolení. Konečné povolení však má rozložení hodnot ve spektru velmi proměnlivé, v nízkých frekvencích zhruba do 6 kHz dochází k dalšímu vzrůstu, nicméně mezi 12 až 33 kHz dochází naopak k poklesu hodnot. Nad 33 kHz pak opět povolení způsobuje vzrůst hodnot.

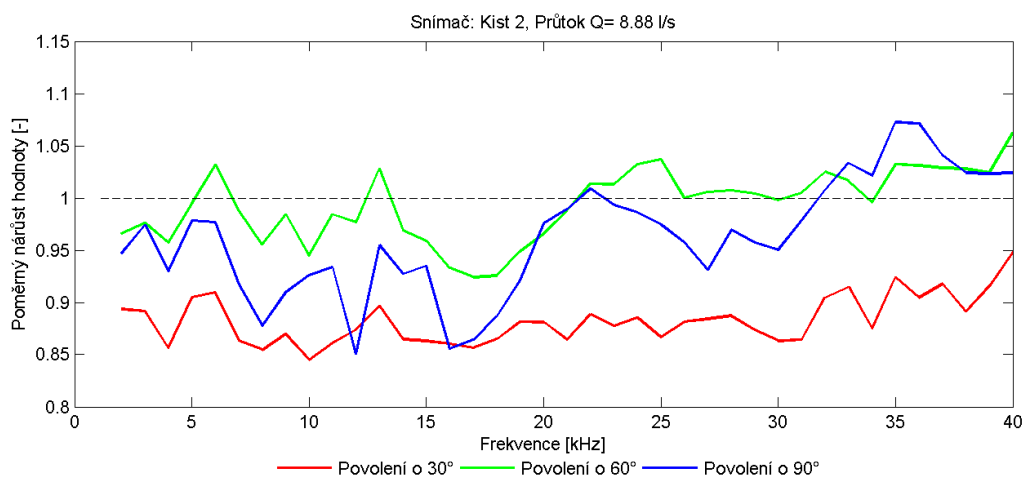


#### 4.4.5 POMĚRNÉ ZMĚNY – SNÍMAČ KISTLER 2



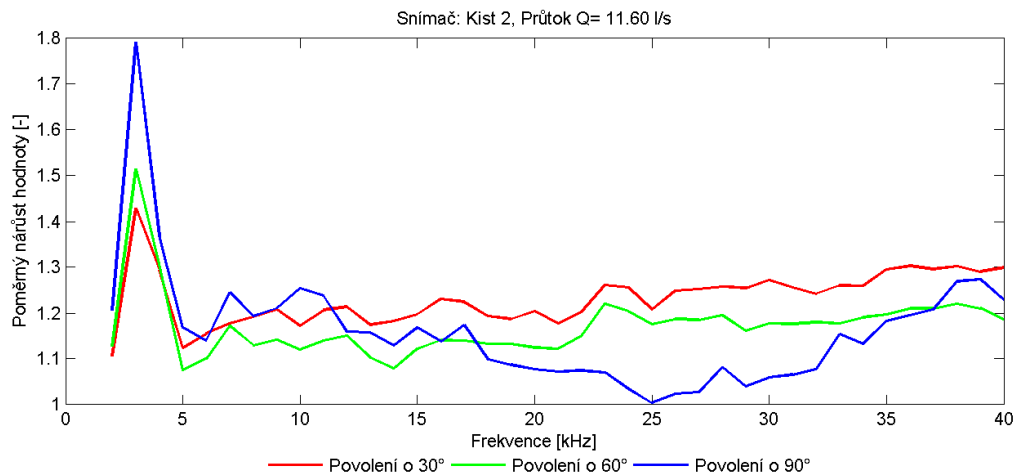
Obrázek 4.49 Poměrné změny snímače Kistler 2 při průtoku 6,51 l/s

Vzhledem k použití stejného snímače, jako v předchozím případě a jde pouze o jiné umístění je očekávatelný velmi podobný výsledek. Při bližším porovnání je možno říct, že jde o téměř identické výsledky, pouze s malými odchylkami vzniklými právě posunem.



Obrázek 4.50 Poměrné změny snímače Kistler 2 při průtoku 8,88 l/s

Tento graf je velmi podobným případem. V porovnání s grafem prvního snímače je graf velice podobný. Není zde tak výrazný propad s následným prudkým vzrůstem v 13 kHz. Všechny tři povolení mají rovnoměrnější průběh.



Obrázek 4.51 Poměrné změny snímače Kistler 2 při průtoku 11,6 l/s

Při maximálním průtoku se odchylky obou tlakových snímačů velice zvýraznily. Prvním odlišným znakem je vysoký vzrůst v oblasti 4 kHz, který roste s každým povolením, což by byl ideální případ. Tento skok je u předchozího snímače pouze částečný a jen u plně povoleného šroubu. Zbývající část spektra je téměř vyrovnaná bez velkých výchylek, u předchozího snímače jsou viditelné skoky větší. Obecný tvar průběhu plně povoleného šroubu je však velice podobný. Výraznější odchylky jsou pouze v oblasti 20, 25 a 35 – 40 kHz, kde se vyskytují „hrby“.



## 5 ZÁVĚR

Úkolem této diplomové práce bylo objasnění, zda je pro monitorování strojních součástí u hydraulických strojů vhodné využívat metodu akustické emise. Tato metoda se již osvědčila v mnoha oblastech průmyslu. Zejména při kontrole tlakových nádob a sledování kvality svarových spojů. Motivace využití této metody tkví v její nesporné výhodě oproti konvenčním typům kontroly hned v několika ohledech. Tato principiálně jednoduchá metoda využívá tlakového vzruchu vzniklého například při šíření trhliny jako informačního zdroje, a je tak pasivní. Vzhledem k povaze šíření tlakových pulzací je možno pomocí několika málo snímačů monitorovat poměrně velkou část stroje.

Pro použití diagnostiky pomocí akustické emise, vzhledem k běžnému rozsahu desítek až stovek kilohertzů, je nutno používat speciální snímače schopné tyto frekvence zachytit. Nicméně akustická emise se projevuje v celém frekvenčním pásmu, tedy rovněž u slyšitelných frekvencí. Právě tohoto pásma jsme s mírným rozšířením využili, neboť bylo možné použít standardní snímače zrychlení a snímače tlaku. Nevýhodou tedy bylo jisté omezení z hlediska frekvencí, které jsme schopni zpracovávat. Nespornou výhodou však bylo využití snímačů, kterými byla laboratoř již vybavena. Také vzhledem k nižším frekvenčním rozsahům a od nich se odvíjejících vzorkovacích frekvencí také menší výpočetní náročnost při měření a zpracovávání dat.

Takto naměřená data byla zpracovávána pomocí k tomuto účelu vytvořeného programu v softwaru MATLAB. Postupným zpracováváním jednotlivých měřených bodů byly vytvořeny grafy škálovaných efektivních hodnot. Byly tedy vypočteny efektivní hodnoty pro každé frekvenční pásmo o šířce 1 kHz, a tyto hodnoty byly vyneseny do grafů pro jednotlivé snímače a konfigurace měření. Pomocí těchto grafů tak byly porovnávány průběhy efektivních hodnot utaženého a povoleného šroubu za různých podmínek. Druhým zpracováním pak bylo vytvoření grafů s poměrnou změnou hodnot. Tyto grafy byly vytvořeny pomocí poměrných hodnot vztažených k výchozímu stavu, který byl ve všech případech šroub utažený. Bylo tak možné zjistit, zda vlivem povolení šroubu došlo k vzrůstu či poklesu efektivních hodnot za daných podmínek.

Zdrojem dat k zpracování byly dva měřené experimenty provedené v laboratořích OFIVK. Oba experimenty se zabývaly pozorováním projevu šroubu umístěného do proudu kapaliny v trubici. Pomocí soustavy snímačů byly měřeny tlakové pulzace a zrychlení v několika místech. První experiment byl zaměřen zejména na vliv předepnutí šroubu, klapky a průtoku kapaliny, kterou je šroub buzen na akustický projev. Druhý experiment byl pak zaměřen více na vliv předepnutí šroubu, a množství předepnutí bylo při tomto měření zvýšeno na 4 různá předepnutí. Z důvodu zodpovězení otázky, zda pozice snímačů na měřeném tělese ovlivňuje zaznamenaná data, byla navíc u druhého experimentu orientace trubice obrácena.

Z výsledků uvedených v grafech plynou následující závěry. U prvního experimentu byl obecným trendem růst efektivních hodnot s vzrůstajícím průtokem, což je logické. Vlivem průtoku kapaliny kolem šroubu dochází k jeho buzení. Čím výraznější buzení je, tím větší bude kmitání a tedy i hodnota zaznamenaného impulsu. Tento trend byl pozorován u všech snímačů, nicméně rostoucí průtok způsoboval u různých snímačů nesporně rostoucí amplitudy efektivních hodnot. Tento jev lze vysvětlit různými umístěními a orientacemi snímačů. Vzhledem k orientaci šroubu svisle do trubice jsou oba hlavní směry kmitání vodorovné.



Je tedy předpokladatelné, že kmitání v ose y, ve které byl umístěn jeden ze snímačů zrychlení, bude mít jiné rozložení spektra a pravděpodobně také nižší amplitudy. Při pohledu do grafů se toto chování potvrdilo. Střední hodnoty amplitud jsou vždy o něco menší, nicméně některé frekvence dosahují stejných amplitud jako u snímačů orientovaných vodorovně. Výsledky snímačů tlaku Kistler pak byly zcela odlišné od snímačů zrychlení, což je způsobeno pravděpodobně samotným mechanismem přenosu tlakových impulzů pomocí kapaliny místo kovu jako v případě akcelerometru. Tlakové snímače měly hladší průběhy amplitud napříč spektrem a nebyly tak citlivé na jednotlivé odchylky jako akcelerometry.

Předpokládalo se, že vlivem uvolnění šroubu bude docházet k jeho výraznějšímu kmitání a tím pádem také k vyšším zaznamenaným výchylkám. Nicméně výsledky měření tomuto předpokladu ne vždy odpovídaly. Zejména u nízkých průtoků bylo chování spíše opačné a efektivní hodnoty vlivem povolení šroubu klesly. Při středním a vysokém průtoku však hodnoty ve většině případů vzrostly. U tlakových snímačů pak hodnoty vzrostly v celém spektru, a jsou viditelně odsazeny.

Vzhledem k velmi výraznému projevu kavitace při měření s otevřenou klapkou docházelo velmi brzy k přetížení snímačů zrychlení, což se projevilo extrémními skoky měřených hodnot v nízkých frekvencích spektra. Pro posunutí použitelnosti snímačů, aniž by byly přetížené, byla využita klapka před vratným vtokem do nádrže. Její vliv na měřené hodnoty byl také velice předpokladatelný. Vlivem přivření došlo k malému poklesu průtoku vlivem tlakových ztrát, ale hlavně k zvýšení tlaku v trubici a tedy k omezení projevu kavitace. Zatímco s otevřenou klapkou již byla kavitace plně vyvinutá při průtoku necelých 8 l/s, s přivřenou klapkou to bylo až při 9,8 l/s.

Vlivem přivření klapky spadly hodnoty amplitud zhruba na polovinu a rozdíl projevů mezi utaženým a povoleným šroubem se také zcela změnil. Při malých a středních průtocích jsou rozdíly mezi utaženým a povoleným šroubem jasně viditelné, v maximálním průtoku se však rozdíly zmenšují. Stejný průběh je pak u grafů poměrných změn - zde povolení při malém průtoku způsobí největší poměrné nárůsty a s rostoucím průtokem nárůsty klesají.

Využití této metody u vodních strojů je tedy vhodné spíše v místech s nižšími průtoky a vyššími tlaky, a tedy v místech méně náchylných na vznik kavitace. Právě ta je totiž pravděpodobným viníkem klesání poměrných přírůstků u vyšších průtocích. Příspěvek kmitajícího šroubu k celkovému kmitání soustavy je s rostoucím projevem kavitace čím dál menší. Tento trend je patrný u všech snímačů v rámci prvního experimentu.

Výsledky druhého experimentu jsou již méně směrodatné. Vzhledem k primárnímu zaměření na zjištění závislosti projevu na předepnutí šroubu byl zvýšen počet různých předepnutí za cenu jediného nastavení klapky. V rámci tohoto experimentu podávala nejlepší výsledky měření s nejnižším průtokem. Na těchto grafech je jasně viditelná změna hodnot při prvním povolení. První a druhé povolení však nejsou vzájemně rozpoznatelná s výjimkou malých rozestupů v konkrétních oblastech. Úplné povolení šroubu pak způsobuje opětovné snížení efektivních hodnot až na hodnoty téměř shodné s prvotním předepnutím.

Toto chování je pravděpodobně způsobeno mechanismem přenášení kmitání šroubu do trubice. Při utažení je šroub uchycen z obou stran, a je tak zvýšena jeho vlastní frekvence kmitání a také tlumení. Proto jsou hodnoty malé. Prvním povolením dochází k uvolnění šroubu, jenž může kmitat, a zároveň díky dostatečnému kontaktu s trubicí přenáší kmitání do trubice. Jsou zde tedy dva současně proti sobě fungující mechanismy. Uvolněním šroub



získává volnost ke kmitání, nicméně jeho předepnutí dává možnost tyto kmity přenášet účinně do trubice. Maximum kombinace těchto funkcí je zřejmě při prvním povolení o 30° a pro další povolení již jen klesá. Při vyšších průtocích se hodnoty vzájemně přiblíží a střídavě se protínají. Rozeznání jednotlivých stavů předepnutí je tak velice problematické. Jsou zde však výrazné frekvence, ve kterých hodnoty plně povoleného šroubu s průtokem rostou. Tyto frekvence jsou především 5 kHz a zhruba 10 kHz.

Frekvence 5 kHz je pravděpodobná vlastní frekvence kmitání šroubu, jelikož z provedené modální analýzy vycházela vlastní frekvence zhruba 6500 Hz. Nicméně šlo o teoreticky zjištěnou frekvenci bez tlumení a přídavných účinků kapaliny, které vlastní frekvenci snižují.

Posledním zjištěním experimentů je vliv umístění snímačů na záznam a interpretaci výsledků. Umístění a orientace snímačů je poměrně zásadní, jelikož vlivem buzení kapalinou trubice a šroub kmitají, dochází ke vzniku stojatého vlnění. Toto kmitání je odlišné v rovině vodorovné a svislé. Snímače označené jako X a Y podávaly výsledky rozdílné nejen v rozložení spektra a rozdílných majoritních frekvencí, ale také v jejich amplitudách. Amplitudy v ose Y byly obecně zhruba o třetinu nižší. Vliv pozice umístění v ose trubice byl také velmi značný. Vzhledem k stojatému vlnění je možné, že jeden ze snímačů bude umístěn blíže uzlům, nebo kmitnám různých frekvencí. Rozložení spektra i amplitudy tak mohou být velice rozdílné. Příkladem mohou být výsledky tlakových snímačů Kistler.

Dalším ze zjištění bylo, že snímač zrychlení v ose X umístěný před šroubem ve směru toku, podával v obou experimentech lepší výsledky. Plně povolený šroub byl ve větším dostupu od ostatních předepnutí.

Metoda akustické emise pro použití u hydraulických strojů tedy dle těchto výsledků použitelná je, nicméně má svá omezení. Hlavním omezením je zde využitelnost v místech s nízkými tlaky a projevy kavitace, což omezuje využitelnost na součásti v oblastech s vyššími tlaky jako například u lopat rozvaděče turbíny. Vzhledem k omezenému času a rozsahu této práce však metodika měření a vyhodnocení není zcela vyřešena, nicméně pro zodpovězení otázek zadání je dostačující.

Pro další postup práce by bylo vhodné zejména proměření druhého experimentu s vlivem přivřené klapky a větším počtem předepnutí šroubu. Popřípadě vyřešení lepší metody pro vytvoření přesně definovaného předepnutí šroubu.



## 6 POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. : il., čb. fot., tabulky, grafy. ISBN 8090193625.
- [2] PŘIBÁŇ, Miroslav. *Akustická emise (AE) - teorie a praxe provozních kontrol konstrukcí* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_06\\_1205.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1205.pdf). Učební texty k semináři. VUT Brno.
- [3] VLČEK, Tomáš. *Vyhodnocování akustické emise*. Praha, 2009. Diplomová práce. ČVUT Praha.
- [4] PŘIBÁŇ, Miroslav. *Metoda akustické emise I: Obecná část - základní principy*. Brno: Česká společnost pro NDT, 2012.
- [5] STODOLA, Jiří. *Diagnostika motorových vozidel, Studijní opora*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011.
- [6] *Significance of RMS (Root Mean Square) value* [online]. 2015 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.gaussianwaves.com/2015/07/significance-of-rms-root-mean-square-value/>
- [7] SMITH, Steven W. Chapter 9: Applications of the DFT. In: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* [online]. San Diego: California Technical Publishing, 1997 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.dspguide.com/ch9.htm>
- [8] SMITH, Steven. Chapter 10: Fourier Transform Properties: Parseval's Relation. In: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* [online]. San Diego: California Technical Publishing, 1997 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://www.dspguide.com/ch10/7.htm>





## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Seznam použitých zkratk

AE	[-]	Akustická emise
NDT	[-]	Nedestruktivní diagnostická technika
RMS	[-]	(root mean square) efektivní hodnota
FT	[-]	Fourierova transformace
DFT	[-]	Diskrétní Fourierova transformace
m-file	[-]	Textový soubor obsahující program pro software MATLAB
$E_{RMS}$	[-]	Efektivní hodnota
$b_{tr}$	[-]	Hraniční bod ve frekvenční oblasti
$X(f)$	[-]	Bod záznamu po FT (je funkcí frekvence)

### Seznam použitých veličin

$f_{tr}$	[Hz]	Hraniční frekvence
$f$	[Hz]	Frekvence
$F_s$	[Hz]	Vzorkovací frekvence
$Q$	[l/s]	Průtok
$p_i$	[kPa]	Tlak
$a_i$	[g]	Zrychlení
$T$	[s]	Délka časového záznamu
$N$	[-]	Počet vzorků



## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Vlnění v pružném prostředí [1] .....	17
Obrázek 1.2 Schématický princip metody akustické emise.....	19
Obrázek 2.1 Příklady zpracování signálu. Frekvenční filtrace (a) a časová selekce (b). [5]...	20
Obrázek 2.2 Záznam okamžitých hodnot a jejich střední hodnota .....	21
Obrázek 2.3 Efektivní hodnota (červeně) periodického průběhu (modře) .....	21
Obrázek 2.4 Příklad časové a frekvenční oblasti zvuku [30] (originál upraven překladem)...	22
Obrázek 3.1 Schéma měřicí tratě, na které bude experiment proveden.....	24
Obrázek 3.2 Schématický průřez měřeného tělesa .....	25
Obrázek 3.3 Pozice jednotlivých snímačů při měření experimentu.....	25
Obrázek 3.4 Obrázek odkazující na pozice snímačů v následujícím seznamu .....	26
Obrázek 3.5 Realizace úpravy šroubu pro potřeby měření .....	27
Obrázek 3.6 Šroub umístěn do trubice, kde je připevněn přivařenou maticí.....	27
Obrázek 3.7 Umístění snímačů na trubici při prvním měření experimentu.....	28
Obrázek 3.8 Záznam elektrické veličiny tlakoměru za trubici .....	28
Obrázek 3.9 Detail klapky a jejího ovládacího mechanismu.....	29
Obrázek 3.10 Vliv otáčkové frekvence na průtoky.....	29
Obrázek 3.11 Tlakové spády na měřené trubici.....	30
Obrázek 3.12 Ing. Hudec při utahování šroubu momentovým klíčem .....	31
Obrázek 3.13 Orientace měřené trubice se snímači po změně směru proudění .....	31
Obrázek 3.14 Ilustrativní fotky jednotlivých natočení šroubu během měření (zleva původní hodnota, povolení o 30°, 60° a 90°).....	32
Obrázek 3.15 Deformace trubice vlivem velkého předepnutí šroubu. ....	32
Obrázek 3.16 Ilustrační výřez ze souboru naměřených dat .....	33
Obrázek 3.17 Dialogové okno importu dat a zvýraznění možnost vytvoření skriptu.....	33
Obrázek 3.18 Část skriptu s automatizací načítání souborů .....	34
Obrázek 3.19 Přepočet elektrického výstupu snímače na tlak.....	34
Obrázek 3.20 Ilustrace Fourierovy transformace.....	35
Obrázek 3.21 Porovnání FT akcelerometru bez a s odstraněním amplitud nízkých frekvencí	36
Obrázek 3.22 Detail skriptu zabývající se odsazením dat pro výpočet RMS .....	37
Obrázek 3.23 Ilustrační čtveřice grafů Fourierovy transformace s a bez odsazení .....	38
Obrázek 3.24 Grafy s RMS křivkami naměřených hodnot z celého frekvenčního spektra.....	39
Obrázek 3.25 Ilustrace výběru dat z FT pro jednu část spektra .....	40
Obrázek 3.26: Detail části programu zabývající dekompozicí dat FT na jednotlivá spektra a následného výpočtu jejich RMS .....	40
Obrázek 3.27: Graf RMS hodnot akcelerometru v závislosti na frekvenci při různých průtocích.....	41
Obrázek 3.28: 3D grafy stejných výsledků jako předcházející 2D graf (osa frekvencí naopak) vlevo umístěný čárový graf a vpravo plošný .....	41
Obrázek 4.1 Schématické znázornění pozic snímačů dle jejich pojmenování v následujících grafech.....	42
Obrázek 4.2 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 1X, klapka otevřena.....	43
Obrázek 4.3 Efektivní hodnoty zrychlení snímače zrychlení 1X, klapka přivřena .....	43
Obrázek 4.4 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 2X, klapka otevřena.....	44
Obrázek 4.5 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 2X, klapka přivřena .....	44
Obrázek 4.6 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 2Y, klapka otevřena.....	45
Obrázek 4.7 Efektivní hodnoty zrychlení snímače 2Y, klapka přivřena .....	45
Obrázek 4.8 Efektivní hodnoty tlaků snímače Kistler 1, klapka otevřena.....	46



Obrázek 4.9 Efektivní hodnoty tlaků snímače Kistler 1, klapka přivřena.....	46
Obrázek 4.10 Efektivní hodnoty tlaků snímače Kistler 2, klapka otevřena .....	47
Obrázek 4.11 Efektivní hodnoty tlaků snímače Kistler 2, klapka přivřena.....	47
Obrázek 4.12 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 1X, klapka otevřena .....	48
Obrázek 4.13 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 1X, klapka přivřena.....	48
Obrázek 4.14 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 2X, klapka otevřena .....	49
Obrázek 4.15 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 2X, klapka přivřena.....	49
Obrázek 4.16 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 2Y, klapka otevřena .....	50
<i>Obrázek 4.17 Poměrné změny efektivních hodnot snímače 2Y, klapka přivřena .....</i>	<i>50</i>
Obrázek 4.18 Poměrné změny efektivních hodnot snímače Kistler 1, klapka otevřena .....	51
Obrázek 4.19 Poměrné změny efektivních hodnot snímače Kistler 1, klapka přivřena.....	51
Obrázek 4.20 Poměrné změny efektivních hodnot snímače Kistler 2, klapka otevřena .....	52
Obrázek 4.21 Poměrné změny efektivních hodnot snímače Kistler 2, klapka přivřena.....	52
Obrázek 4.22 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 6,51 l/s.....	53
Obrázek 4.23 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 8,88 l/s.....	53
Obrázek 4.24 Graf efektivních hodnot při plném průtoku 11,6 .....	54
Obrázek 4.25 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 6,51 l/s.....	54
Obrázek 4.26 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 8,88 l/s.....	55
Obrázek 4.27 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 11,6 l/s.....	55
Obrázek 4.28 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 6,51 l/s.....	56
Obrázek 4.29 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 8,88 l/s.....	56
Obrázek 4.30 Graf efektivních hodnot zrychlení při průtoku 11,6 l/s.....	57
Obrázek 4.31 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 6,51 l/s.....	57
Obrázek 4.32 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 8,88 l/s.....	58
Obrázek 4.33 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 11,6 l/s.....	58
Obrázek 4.34 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 6,51 l/s.....	59
Obrázek 4.35 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 8,88 l/s.....	59
Obrázek 4.36 Graf efektivních hodnot tlaků při průtoku 11,6 l/s.....	60
Obrázek 4.37 Poměrné změny snímače 1X při průtoku 6,51 l/s .....	61
Obrázek 4.38 Poměrné změny snímače 1X při průtoku 8,88 l/s .....	61
Obrázek 4.39 Poměrné změny snímače 1X při průtoku 11,61 l/s .....	62
Obrázek 4.40 Poměrné změny snímače 2X při průtoku 6,51 l/s .....	62
Obrázek 4.41 Poměrné změny snímače 2X při průtoku 8,881 l/s .....	63
Obrázek 4.42 Poměrné změny snímače 2X při průtoku 11,6 l/s .....	63
Obrázek 4.43 Poměrné změny snímače 2Y při průtoku 6,51 l/s .....	64
Obrázek 4.44 Poměrné změny snímače 2Y při průtoku 8,88 l/s .....	64
Obrázek 4.45 Poměrné změny snímače 2Y při průtoku 11,6 l/s .....	65
Obrázek 4.46 Poměrné změny snímače Kistler 1 při průtoku 6,51 l/s .....	65
Obrázek 4.47 Poměrné změny snímače Kistler 1 při průtoku 8,88 l/s .....	66
Obrázek 4.48 Poměrné změny snímače Kistler 1 při průtoku 11,6 l/s .....	66
Obrázek 4.49 Poměrné změny snímače Kistler 2 při průtoku 6,51 l/s .....	67
Obrázek 4.50 Poměrné změny snímače Kistler 2 při průtoku 8,88 l/s .....	67
Obrázek 4.51 Poměrné změny snímače Kistler 2 při průtoku 11,6 l/s .....	68